

La variabilité intra-individuelle du mouvement en performance pianistique. Une revue exploratoire

Nicholas Séguin and Gilles Comeau

Volume 9, Number 2, December 2022

La santé et le bien-être des musicien·ne·s. Recherche et pratique en dialogue

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1096927ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1096927ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Observatoire interdisciplinaire de création et recherche en musique (OICRM)

ISSN

2368-7061 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Séguin, N. & Comeau, G. (2022). La variabilité intra-individuelle du mouvement en performance pianistique. Une revue exploratoire. *Revue musicale OICRM*, 9(2), 1–28. <https://doi.org/10.7202/1096927ar>

Article abstract

When a movement is repeated several times, subtle differences can be observed between repetitions. In sports biomechanics, studying intra-individual movement variability and its implications has the potential to prevent injuries, assess treatment progress, and inform the development of research protocols (Preatoni *et al.* 2013). While researchers in the field of music share many of these goals, little attention has been paid to intra-individual movement variability. This scoping review aims to consolidate the existing evidence regarding the intra-individual movement variability of piano performance, to shine light on three significant methodological issues: a) what methods have been used to measure this intra-individual movement variability; b) what is the influence of expertise on this intra-individual movement variability and c) how many trials should be used in a research design in order to obtain a reliable assessment of piano performance. Additionally, gaps in our understanding of the phenomenon are identified and recommendations for future research are issued.

La variabilité intra-individuelle du mouvement en performance pianistique. Une revue exploratoire

Nicholas Séguin et Gilles Comeau

Résumé

Lorsqu'un mouvement est répété à plusieurs reprises, de subtiles différences peuvent être observées entre les répétitions. En biomécanique sportive, l'étude de la variabilité intra-individuelle (v_i) du mouvement et de ses implications a le potentiel de prévenir les blessures, d'évaluer le progrès de traitements et d'informer le développement de protocoles de recherche ([Preatoni et al. 2013](#)). Bien que les chercheurs du domaine de la musique partagent plusieurs de ces objectifs, peu d'attention a été accordée à la v_i du mouvement. Cette revue exploratoire vise à consolider les informations existantes concernant la v_i du mouvement en performance pianistique afin d'explorer trois importants enjeux méthodologiques : a) quelles méthodes ont été utilisées pour mesurer cette v_i du mouvement ; b) quelle est l'influence de l'expertise sur cette v_i du mouvement et c) combien d'essais devraient être utilisés dans un protocole de recherche afin d'obtenir une évaluation fiable d'une performance. En outre, les lacunes dans notre compréhension du phénomène sont identifiées et des recommandations pour les recherches futures sont émises.

Mots clés : cognition ; expertise ; performance pianistique ; système neuromusculaire ; variabilité.

Abstract

When a movement is repeated several times, subtle differences can be observed between repetitions. In sports biomechanics, studying intra-individual movement variability and its implications has the potential to prevent injuries, assess treatment progress, and inform the development of research protocols ([Preatoni et al. 2013](#)). While researchers in the field of music share many of these goals, little attention has been paid to intra-individual movement variability. This scoping review aims to consolidate the existing evidence regarding the intra-individual movement variability of piano performance, to shine light on three significant methodological issues: a) what methods have been used to measure this intra-individual movement variability; b) what is the influence of expertise on this intra-individual movement variability and c) how many trials should be used in a research design in order to obtain a reliable assessment of piano performance. Additionally, gaps in our understanding of the phenomenon are identified and recommendations for future research are issued.

Keywords: cognition; expertise; neuromuscular system; piano performance; variability.

INTRODUCTION

Lorsqu'un mouvement est répété à plusieurs reprises, il est possible d'observer de subtiles différences entre chaque répétition de ce mouvement, et ce, même s'il s'agit d'un mouvement simple ou familier (Bernstein 1967 ; Newell 1986). Cette variabilité intra-individuelle (v_i) du mouvement a longtemps été considérée comme une « erreur » du système moteur, c'est-à-dire du bruit indésirable présent dans les mécanismes impliqués dans l'exécution de mouvements (Caballero *et al.* 2017). Sa présence complique donc l'étude de la motricité humaine puisqu'il devient plus difficile de comparer la performance de plusieurs individus, ou différentes performances du même individu (par exemple, avant et après une intervention). Cette perspective a ainsi entraîné des efforts visant à éliminer ou à réduire la présence de cette v_i du mouvement. Toutefois, il est maintenant accepté que la v_i du mouvement est inhérente au mouvement et que son étude permet d'en apprendre plus sur le fonctionnement complexe du système neuromusculaire ([Glazier et Davids 2009](#) ; [Latash, Scholz et Schöner 2002](#)).

La variabilité intra-individuelle du mouvement en biomécanique sportive

Les documents sur le sujet indiquent que même après plusieurs années d'entraînement, les athlètes d'élite sont incapables de reproduire parfaitement les mouvements pour lesquels ils¹ possèdent un haut niveau d'expertise ([Bartlett, Wheat et Robins 2007](#) ; [Davids *et al.* 2003](#)). Cette v_i du mouvement est un facteur important dans la conduite de projets de recherche, car elle influence la sélection de méthode de recherche et l'analyse de données. La biomécanique sportive travaille donc sur l'établissement de lignes directrices quant au traitement de la v_i du mouvement dans le cadre de la recherche ([Bartlett, Wheat et Robins 2007](#) ; [Bates, Dufek et Davis 1992](#) ; [Chau, Young et Redekop 2005](#) ; [Preatoni *et al.* 2010](#) ; [Preatoni *et al.* 2013](#)).

La v_i du mouvement d'un individu ou d'une population peut être évaluée en étudiant certains paramètres en lien avec l'activité complétée, par exemple, la longueur de la foulée ou la posture lors de la course à pied. L'analyse de ces paramètres permet d'en apprendre plus sur les caractéristiques d'un mouvement ainsi que les différences entre certaines populations. Une distinction se fait ici entre les paramètres techniques et les paramètres globaux : les paramètres techniques sont spécifiques à l'exécution d'un mouvement (par exemple, le mouvement du bras lors d'un lancer de javelot), tandis que les paramètres globaux font référence à la variabilité du résultat achevé (par exemple, la distance qu'a parcourue le javelot) ([Preatoni *et al.* 2013](#)). Bien que ces deux concepts soient reliés, plusieurs études ont démontré qu'une plus grande invariance dans les paramètres globaux ne signifie pas nécessairement une plus grande invariance dans les paramètres techniques ([Karamanidis, Arampatzis et Brüggemann 2003](#) ; [Messier et Kalaska 1999](#) ; [Preatoni 2007](#) ; [Preatoni *et al.* 2010](#)). Dans une étude comparant des participants atteints de la maladie de Parkinson à des participants en bonne santé, Van Emmerik et collègues ([1999](#)) démontrent que la v_i

1 Dans cet article, l'emploi du genre masculin a pour but d'alléger le texte et d'en faciliter la lecture.

de paramètres techniques est une meilleure mesure de la différence entre les groupes que la v_i de paramètres globaux.

Puisque les habiletés motrices représentent la capacité à produire un résultat prédéterminé avec un fort degré de certitude ([Newell et Ranganathan 2009](#) ; Schmidt et Lee 2011), la v_i du mouvement a depuis longtemps été utilisée en tant que déterminant du niveau d'expertise (Caballero *et al.* 2017 ; [Churchland, Afshar et Shenoy 2006](#) ; [Harris et Wolpert 1998](#) ; [Osborne, Lisberger et Bialek 2005](#) ; [Schmidt *et al.* 1979](#) ; [Shmuelof, Krakauer et Mazzoni 2012](#)). On remarque, par exemple, plus de v_i du mouvement dans certains mouvements de cyclistes novices en comparaison à des cyclistes experts ([Chapman *et al.* 2009](#)). Une possible interprétation de ces résultats est que les experts ont plus de facilité à s'adapter aux diverses contraintes lors de la production de séquences motrices, menant à une v_i du mouvement réduite, tandis que les novices sont toujours à la recherche de la séquence motrice la plus appropriée ([Glazier et Davids 2009](#)). Cependant, il faut faire preuve de prudence avant de conclure quoi que ce soit sur la fonction de la variabilité de certains paramètres, puisque le résultat inverse a aussi été observé dans d'autres disciplines sportives, où les mouvements de novices présentaient moins de variabilité que ceux d'experts (Arutyunyan *et al.* 1968 ; Schöllhorn et Bauer 1998).

Pour l'étude des habiletés motrices, il est recommandé de mesurer la performance du sujet à plusieurs reprises ([Chau, Young et Redekop 2005](#)), puisque l'analyse d'un seul essai pourrait mener à des conclusions erronées ([Bates, Dufek et Davis 1992](#)). Cependant, il n'existe pas de lignes directrices quant au nombre d'essais nécessaire afin d'obtenir une évaluation fiable qui pourra ensuite être comparée à d'autres évaluations subséquentes. Une solution potentielle à ce problème est la procédure d'estimation séquentielle (*sequential estimation procedure*) telle qu'employée par Hamill et McNiven (1990). Un exemple de son application peut être retrouvé dans Preatoni et collègues (2010), où les auteurs déterminent que jusqu'à 15 essais étaient nécessaires pour obtenir une mesure fiable d'une multitude de paramètres techniques décrivant la marche athlétique. Ce genre d'étude permet de fournir une ligne directrice aux études subséquentes quant au nombre d'essais à utiliser.

La variabilité intra-individuelle du mouvement en performance pianistique

La v_i du mouvement joue également un rôle lors de toute performance pianistique. Il est bien établi qu'un pianiste ne peut accomplir deux interprétations identiques d'une même pièce, et ce, même à un niveau professionnel après plusieurs heures de répétition ([Chaffin, Lemieux et Chen 2007](#) ; [Demos, Lisboa et Chaffin 2016](#)), ou lorsqu'on lui demande de répliquer sa performance précédente ([Heinlein 1929](#) ; [Keller, Weber et Engel 2011](#) ; Krampe 1994 ; MacKenzie, Nelson-Schultz et Wills 1983).

L'étude de la v_i du mouvement est moins prévalente en performance musicale que dans d'autres domaines. D'abord, le domaine sportif peut faire usage de mesures objectives (par exemple, vitesse, distance) afin de quantifier la performance d'un athlète, tandis que l'évaluation d'une performance musicale est beaucoup plus subjective ([Lipke-Perry, Dutto et Levy 2019](#)). Il est possible de mesurer des paramètres objectifs d'une performance musicale (par exemple, stabilité du rythme

ou des nuances), cependant, la mesure de ces derniers ne se traduit pas nécessairement en une évaluation objective de la qualité de la performance. Une autre raison potentielle serait la différence entre la connotation associée à la *vi* du mouvement dans le domaine des sports, et celle qu'elle possède dans le domaine de la musique. Chez les musiciens professionnels, la *vi* du mouvement présente dans la performance peut mener à une impression de « spontanéité » rendant ainsi chaque interprétation du même interprète unique ([Chaffin, Lemieux et Chen 2007](#)). De ce fait, la *vi* du mouvement a souvent une connotation plus positive en musique, et il y a donc moins d'intérêt à étudier ce phénomène dans ce contexte.

Historiquement, les efforts de recherche quant à la *vi* du mouvement ont été dirigés vers les paramètres globaux, selon le point de vue que l'étude de ces derniers est complémentaire à l'étude de paramètres techniques. Par exemple, Wilson avance :

It is obvious that a digitized record of keyboard activity is not a record of motor performance per se; we see not what the hand, fingers, and arm do, but rather how the keys respond to digitally applied forces. But such a record of key movement is as much a record of performance consistency as any reconstruction of the limb movements themselves would be, and constitutes an important source of information to be exploited for clues about human neuromuscular and biomechanical regulation. (Wilson 1992, p. 81)

Cependant, il demeure qu'une portion considérable de la *vi* du mouvement en performance pianistique, soit celle définie par les paramètres techniques, demeure sous-étudiée. Bien que récemment, de plus en plus d'études font emploi de technologies de suivi des mouvements afin d'enquêter la variabilité de paramètres techniques (voir Furuya et Kinoshita 2008 ; [Tominaga et al. 2016](#) ; [Verdugo et al. 2020](#) ; [Verdugo et al. 2021](#)), celles-ci portent sur des performances de courtes séquences de notes ou de mouvements pianistiques isolés et ne seront donc pas abordées dans ce document. Néanmoins, ces études démontrent que, dans un contexte pianistique, la variabilité de paramètres globaux et de paramètres techniques sont liées.

En outre, l'étude de la *vi* du mouvement dans un contexte musical peut être bénéfique. D'abord, cela permettrait au domaine de la musique de contribuer aux enquêtes sur la *vi* du mouvement et sur le fonctionnement du système neuromusculaire ([Bartlett, Wheat et Robins 2007](#)). L'étude de ce phénomène pourrait également mener à la prévention de blessures masquées par la *vi* du mouvement ([Preatoni et al. 2013](#)), ou contribuer au diagnostic de certaines conditions, comme la dystonie focale ([Jabusch, Vauth et Altenmüller 2004](#)). Enfin, une meilleure compréhension de la *vi* du mouvement pourrait mener au développement de protocoles plus robustes facilitant la comparaison entre plusieurs performances du même individu ou entre groupes. Particulièrement, de tels protocoles pourraient s'avérer utiles dans le cadre d'études faisant usage de la méthode expérimentale comparant la performance musicale avant et après une intervention : Ajero (2007), Davis (2001), Henley (1999), Slade (2018), Vercueil, Taljaard et Plessis (2011) et Woody (2006).

Ainsi, il est important d'étudier la *vi* du mouvement dans un contexte musical, et plus particulièrement pianistique. Certaines études se sont penchées sur, par exemple, la *vi* du mouvement dans le cadre de performances musicales au violon ([Michaud, Begon et Duprey 2022](#)) et au marimba ([Loria et al. 2022](#)), toutefois, la majorité

de la documentation sur ce sujet porte sur la performance pianistique. De plus, les pianistes représentent une catégorie de musiciens à la base de plusieurs études expérimentales. Un premier jalon dans la réalisation de cet objectif est d'effectuer un compte rendu des informations que nous possédons actuellement quant à la VI du mouvement en performance pianistique, nous permettant ainsi de mieux diriger nos efforts subséquents vers les lacunes qui auront été identifiées. La revue exploratoire représente un processus pouvant accomplir cet objectif. Comparées aux revues systématiques, les revues exploratoires ont habituellement une étendue plus large et ne jugent pas nécessairement de la qualité des documents sélectionnés ([Arksey et O'Malley 2005](#)). De plus, les revues exploratoires sont préférables lorsqu'il existe peu de données rigoureuses sur un sujet, permettant ainsi d'inclure des études avec un vaste spectre de méthodologies ([Levac, Colquhoun et O'Brien 2010](#)).

L'approche employée pour notre étude permettra de décrire comment la VI du mouvement en performance pianistique se manifeste, d'offrir des recommandations méthodologiques aux chercheurs, et d'identifier les lacunes dans notre compréhension du sujet.

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie employée dans cette revue exploratoire est étayée sur le modèle développé par Arksey et O'Malley et divisé en cinq étapes : « (1) *identifying the initial research questions*, (2) *identifying relevant studies*, (3) *study selection*, (4) *charting the data*, and (5) *collating, summarizing and reporting the results* » ([Arksey et O'Malley 2005](#), p. 22).

L'identification des questions de recherche initiales

Notre premier objectif a été d'identifier les paramètres de la performance pour lesquels la VI a été étudiée. Après l'identification de ces paramètres, les questions suivantes ont été développées, inspirées par les avancées faites dans le domaine de la biomécanique, afin de guider la recherche :

1. Quelles méthodes ont été employées afin de mesurer la VI de ces paramètres ?
2. Que pouvons-nous conclure quant au rôle de l'expertise sur la VI de ces paramètres ?
3. Que pouvons-nous conclure quant au nombre minimal d'essais requis afin d'obtenir une évaluation fiable de ces paramètres, et ce, en fonction de la population à l'étude ?

L'identification des études pertinentes

Arksey et O'Malley (*ibid.*) suggèrent d'utiliser une stratégie de recherche développée à partir des concepts clés en lien aux questions de recherche. Pour ce faire, nous avons sélectionné certains mots clés afin d'identifier tout document pertinent permettant de répondre aux questions de recherches établies. D'autres mots clés ont été rajoutés après une recherche ayant permis d'identifier les termes les plus pertinents pour chaque concept. Une liste de ces mots clés est présentée dans le tableau 1.

Puisque nous anticipions qu'il existerait peu de recherche sur le sujet, le seul critère d'exclusion employé exigeait que le document soit rédigé en anglais ou en

français. Les bases de données suivantes ont été consultées : [ProQuest Dissertations and Theses](#), [PsycINFO](#), [JSTOR](#), [ERIC](#) et [uOttawa Library Catalogue](#). Les bibliographies de certains articles pertinents ont également été consultées afin d'identifier d'autres documents pertinents. Certains documents ont été recommandés par des pairs.

Catégorie	Mots clés
Performance musicale	piano; performance pianistique; performance musicale; exercices techniques; gammes; arpèges
Variabilité	variabilité; fiabilité; stabilité; régularité; répétabilité
Paramètres	rythme; tempo; timing; intensité; nuances; vitesse; articulation; legato; pédale; erreurs; mouvement; posture; angle
Expertise	Expertise; expérience; entraînement; habileté; pratique

Tableau 1 : Mots clés employés.

La sélection des études

Un total de 104 documents a été identifié à l'aide des mots clés utilisés. Une revue des résumés a révélé plusieurs documents abordant la fiabilité (*reliability*) de scores accordés par des juges pour une performance musicale. D'autres documents ont observé plusieurs interprétations dans le cadre de leur protocole expérimental, mais n'ont pas rapporté de données quant à la VI du mouvement. Ces documents ont donc été retirés lors de la première étape de sélection. Parmi les 51 articles retenus pour une évaluation complète, 4 ont été exclus, car la condition expérimentale affectait les performances répétées, et donc la VI du mouvement ([Bresin et Battel 2000](#) ; [Flückiger, Grosshauser et Tröster 2018](#) ; [Paulig et al. 2014](#)), ou parce que les données pertinentes dans le document provenaient d'études antérieures ([Jacobs et Bullock 1998](#)). 48 documents ont été retenus pour la synthèse qualitative, bien que certains contenaient peu d'information. Le processus de sélection suivait les recommandations du *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses Extension for Scoping Reviews* ([PRISMA-ScR](#)). La figure 1 démontre le processus de sélection.

L'organisation des données

Pour chaque article, certaines informations ont été récoltées (voir tableau 2). En plus de ces informations, un résumé des résultats pertinents a été rédigé pour chaque article. Au fil de la revue, les documents retenus ont été organisés selon le type de stimulus employé, puis regroupés en fonction des paramètres étudiés. En effectuant la revue, il a été possible d'établir cinq paramètres prédominants parmi ces études : la présence d'erreurs, l'intensité, l'articulation, l'utilisation de la pédale et le rythme. Les études contenant de l'information quant à l'influence de l'expertise sur la VI du mouvement ont également été identifiées et regroupées. Le groupement de ces paramètres a été effectué afin de répondre aux questions de recherche et de mieux concentrer nos analyses, nous permettant ainsi d'identifier les thèmes pertinents parmi les informations recueillies.

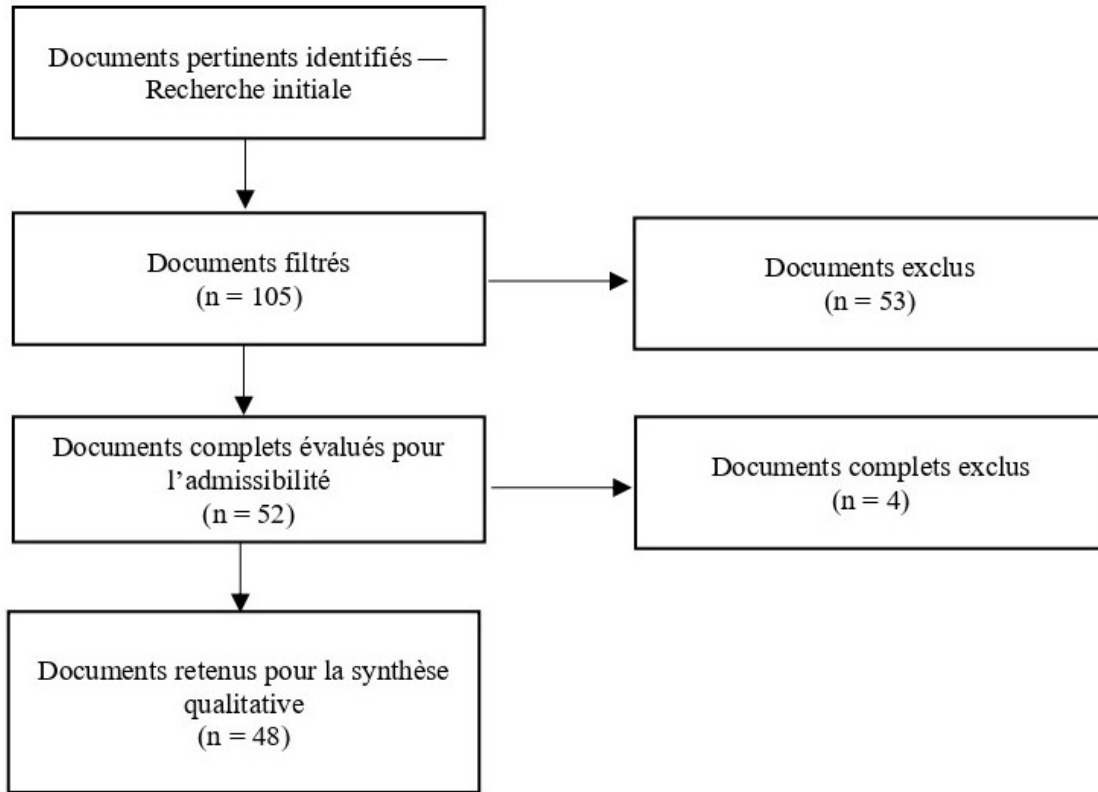


Figure 1 : Organigramme du processus d'identification de documents. Les documents retenus pour la synthèse qualitative se trouvent dans la bibliographie et sont marqués d'un astérisque.

Informations générales	<ul style="list-style-type: none"> • Titre • Auteur(s) • Date de publication
Informations quant à la méthodologie	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau d'expertise des participants • Type de stimulus employé <ul style="list-style-type: none"> ○ Exercices techniques (p. ex., gammes, arpèges, etc.) ○ Stimulus comprenant une composante expressive (p. ex., un morceau, un stimulus musical créé sur mesure) • Nombre de répétitions du stimulus • Durée séparant les interprétations

Tableau 2 : Informations recueillies des documents retenus.

La collecte, la synthèse et la communication des résultats

La dernière étape du modèle méthodologique établi par Arksey et O'Malley (2005) vise à résumer et à rapporter les résultats, ce qui est accompli dans la section suivante à l'aide d'une approche descriptive analytique. Il sera d'abord question des résultats généraux, puis des réponses aux questions de recherche établies plus haut. Les

lacunes dans notre compréhension actuelle de la v_i du mouvement en performance pianistique seront soulignées au fur et à mesure.

SYNTHÈSE ET DISCUSSION

Résultats généraux

1. Paramètres identifiés

Notre revue avait d'abord comme objectif de déterminer quels paramètres de la performance pianistique ont été identifiés et étudiés dans la littérature existante. Parmi les 48 documents retenus, 5 paramètres ont été identifiés : la présence d'erreurs (4 études), l'intensité (13 études), l'articulation (6 études), l'utilisation de la pédale forte (2 études) et le rythme (36 études) (voir tableau 3). Comme il est possible de le constater, ces paramètres sont tous des paramètres globaux (paramètres qui définissent le résultat final d'un mouvement) et non des paramètres techniques (paramètres qui définissent les mouvements).

Cette absence d'information a une incidence sur les conclusions tirées dans cette revue. Bien qu'un thème courant parmi les études retenues soit que les paramètres étudiés démontrent peu de v_i , il est bien établi en biomécanique qu'une faible v_i du résultat final ne reflète pas nécessairement une faible v_i de la manière dont ce résultat a été achevé ([Messier et Kalaska 1999](#) ; [Preatoni 2007](#)) et, de surcroît, certains auteurs sont arrivés à la conclusion selon laquelle la mesure de paramètres globaux offre une évaluation moins sensible des différences entre différents groupes que la mesure de paramètres techniques ([Preatoni et al. 2013](#) ; [Van Emmerik et al. 1999](#)). Il est tout à fait possible que la performance pianistique varie plus largement qu'il ne le semble. Bien que certains paramètres soient considérablement stables d'interprétation en interprétation, il se peut que la manière dont ces paramètres sont achevés le soit moins. Des enquêtes sur la v_i de paramètres techniques pourraient ainsi dévoiler d'importantes informations à ce sujet.

2. Contextes de performance

Cette revue a de même identifié deux contextes distincts dans lesquels ces paramètres peuvent être observés, soit l'interprétation de morceaux (31 études) et l'exécution d'exercices techniques (18 études). La décision de séparer ces deux contextes se justifie par la différence entre les objectifs qui gouvernent la performance dans chacun de ces contextes. Un morceau comprend généralement une composante expressive, et sa performance pourrait différer entre divers pianistes si ces derniers prennent différentes décisions face à leurs interprétations. La performance d'un exercice technique est en contrepartie régie par l'objectif de conserver une intensité, une articulation et un rythme constant tout au long de son exécution. Certaines études font aussi l'emploi de stimuli développés sur mesures, et par conséquent, ne se servent pas de morceaux ou d'exercices techniques courants (voir [Drake et Palmer 1993](#) ; [Repp 1995a, 1997a](#)). Toutefois, il est tout de même possible de catégoriser ces stimuli dans l'un des contextes mentionnés ci-dessus. Enfin, il est à noter que la présence

d'erreurs et l'utilisation de la pédale forte n'ont pas été étudiées dans le contexte d'exécution d'exercices techniques.

3. Types de variabilité

Notre étude a permis d'identifier que la VI du mouvement en performance pianistique peut être divisée en deux catégories : la stabilité et la régularité (figure 2). La stabilité est ce qui vient sans doute à l'esprit lorsque le terme variabilité est mentionné, c'est-à-dire la VI d'un paramètre entre plusieurs répétitions distinctes d'un stimulus (par exemple, à quel point le rythme est-il similaire entre deux interprétations de *Träumerei* données par le même interprète ?). La régularité, quant à elle, concerne la variabilité d'un paramètre au sein d'un stimulus (par exemple, à quel point le rythme varie-t-il pendant l'exécution d'une seule gamme ?). Ces définitions sont inspirées des termes avancés par Van Vugt, Jabusch et Altenmüller (2012) concernant la variabilité dans l'exécution de gammes. Les discussions suivantes aborderont les différentes applications de ces deux types de VI et les divers phénomènes qui s'y rattachent. Toute mention de VI englobe les deux sous-divisions.

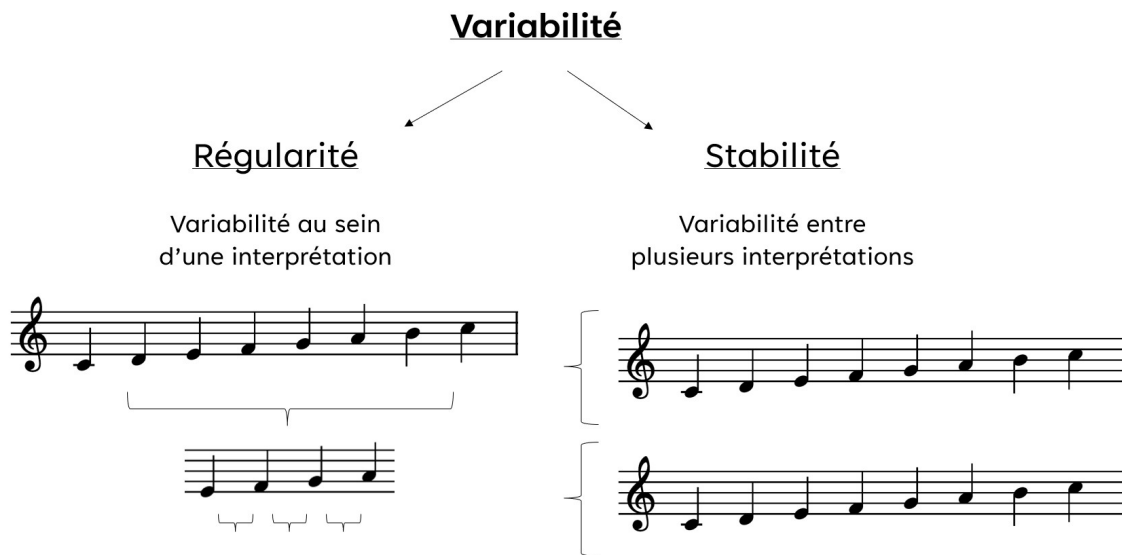


Figure 2 : Diagramme démontrant la différence entre la régularité et la stabilité. La stabilité se veut la variabilité entre les répétitions d'un stimulus, tandis que la régularité est la variabilité au sein d'une seule interprétation d'un stimulus.

Méthodes de mesure de la variabilité intra-individuelle du mouvement

1. Variables discrètes

En biomécanique sportive et dans les autres sciences du mouvement, la VI de paramètres exprimés sous la forme de variables discrètes est habituellement mesurée à l'aide de l'étendue, la variance, l'écart type, le coefficient de variation (cv) ou l'écart interquartile (*interquartile range* ou IQR), l'écart type et le cv étant les plus courants (Stergiou 2004, p. 46-49). Certains chercheurs recommandent de faire usage de mesures non paramétriques, comme l'IQR et l'écart médian absolu (*median absolute*

deviation ou MAD), puisque ces mesures ne présument pas que les données sont distribuées normalement (Chau et Parker 2004 ; Chau, Young et Redekop 2005 ; Preatoni et al. 2013). Le cv est également particulièrement utile afin de comparer la variabilité entre deux performances dont les valeurs moyennes diffèrent grandement. En outre, alors que les autres mesures sont des mesures absolues, le cv est plutôt une mesure relative de la variabilité exprimée en pourcentage, ce qui facilite la comparaison du taux de variabilité.

Paramètre	Définition
La présence d'erreurs	Toute déviation de la partition ou de la performance attendue. Typiquement divisé en sous-catégories, telles que <i>pitch</i> , <i>duration</i> , <i>correction</i> et <i>pause</i> (Drake et Palmer 2000).
L'intensité	Le volume d'une interprétation. Ce paramètre peut être mesuré à partir du niveau acoustique des notes jouées (en décibels), ou à partir de la vitesse avec laquelle une touche a été appuyée (typiquement en unités arbitraires fournies par l'interface numérique d'un instrument (<i>Musical Instrument Digital Interface</i> , ou MIDI).
L'articulation	La durée du chevauchement (ou l'absence de chevauchement) entre deux notes jouées. Typiquement mesurée à l'aide du <i>Key Overlap Time</i> (KOT), soit la durée, en millisecondes, du chevauchement entre les notes. Une valeur positive signifie qu'il y a chevauchement (et donc qu'il s'agit d'une articulation <i>legato</i>), tandis qu'une valeur négative signifie qu'il n'y a pas de chevauchement (et donc qu'il s'agit d'une articulation détachée ou <i>staccato</i>).
L'utilisation de la pédale forte	L'utilisation de la pédale forte, soit la pédale droite d'un piano qui maintient le son d'une note même après que celle-ci n'est plus appuyée. Ce paramètre peut être mesuré en valeurs absolues (pédale appuyée ou non), ou en unités plus fines représentant le degré d'appui (typiquement des unités MIDI arbitraires).
Le rythme	La composante temporelle d'une interprétation. Ce paramètre peut être mesuré à l'aide de l' <i>inter-onset interval</i> (IOI), c'est-à-dire la durée, en millisecondes, entre l'appui d'une note et l'appui d'une seconde note. Le rythme peut également être mesuré à l'aide de l' <i>inter-bar interval</i> (IBI) de deux mesures, soit la durée entre le début d'une mesure et le début d'une seconde mesure. Il est aussi possible de mesurer le tempo local ou global d'une interprétation (en battements par minute, <i>beats per minute</i> ou BPM), ou la durée totale d'une interprétation (en secondes ou minutes).

Tableau 3 : Glossaire des paramètres retenus.

Parmi les paramètres identifiés, la présence d'erreurs et l'utilisation de la pédale forte sont les plus susceptibles de prendre la forme de variables discrètes en calculant leur fréquence d'apparition ou d'utilisation lors d'une performance (en valeur absolue ou en pourcentage). Néanmoins, très peu d'études ont directement examiné la vi de ces paramètres à l'aide des statistiques descriptives mentionnées. Palmer et van de Sande (1993), ainsi que Drake et Palmer (2000), ont complété une analyse de variance sur le taux d'erreur de différents groupes de pianistes à des fins de comparaison. Quant à l'utilisation de la pédale forte, Heinlein (1929) et Repp (1996a) ont tous deux employé l'étendue afin de quantifier cette vi. Ces analyses ont toutefois été conduites sur de petits échantillons (quatre et deux pianistes, respectivement). Évaluer la vi de ce paramètre sur un plus grand échantillon pourrait ainsi révéler plus d'informations.

De plus, ces deux études ont démontré que l'utilisation de la pédale varie largement entre différents pianistes. Dans le cadre de la même étude, Heinlein (1929) remarque que pour le même morceau, deux pianistes professionnels ont utilisé la pédale 51 et 135 fois. De ce fait, le coefficient de variation pourrait s'avérer une meilleure mesure de la VI de ce paramètre à des fins de comparaison.

L'intensité, l'articulation et le rythme peuvent également prendre la forme de valeurs discrètes, ce qui s'avère particulièrement utile lors de l'évaluation de la régularité. Par exemple, Salmon et Newark (1989) utilisent l'écart type afin de quantifier la régularité de l'intensité, de l'articulation et de la durée des notes durant l'énoncé initial d'un sujet de fugue. Cette régularité est pertinente puisque ces paramètres devraient, en théorie, être constants tout au long de l'interprétation de ce thème, et donc l'amplitude de cette VI reflète la maîtrise du pianiste sur cette constance. La régularité permet également de démontrer, par exemple, que des pianistes avancés varient plus largement l'intensité d'une interprétation que des pianistes amateurs (Krampe et Ericsson 1996). La régularité est également particulièrement pertinente dans le cadre d'exécution d'exercices techniques où l'objectif est de conserver une intensité, une articulation et un rythme constant. Wagner (1971) utilise l'écart type afin de démontrer la relation entre le tempo et la régularité, où cette dernière est maximisée à un tempo de 6-9 notes par seconde et diminue plus le tempo s'éloigne de cette portée. Ce résultat a été corroboré par Mackenzie et Van Eerd (1990) à l'aide de l'écart type et du coefficient de variation.

2. Variables continues

Lorsqu'il en vient à la stabilité des paramètres, il est préférable d'envisager les valeurs récoltées en tant que valeurs continues, représentant le changement d'un paramètre tout au long d'une interprétation. Ces mesures sont, en ce sens, analogues aux mesures continues employées en biomécanique sportive. En effet, lorsqu'un mouvement est répété par un individu, ce dernier ne produit pas des motifs cinétiques qui se chevauchent parfaitement, mais plutôt une famille de courbes qui diffèrent en amplitude ou en synchronisation temporelle (Preatoni *et al.* 2013). Une manière de représenter la VI de ces courbes est de simplement les superposer sur le même graphique (intitulés graphiques de séries temporelles, *time-series graphs*) (Stergiou 2004). Il est toutefois plus pertinent d'illustrer une courbe de la VI à l'aide d'intervalles de confiance, par exemple, en dépeignant la courbe moyenne \pm un multiple de son écart type (Preatoni *et al.* 2013).

Van Vugt, Jabusch et Altenmüller (2012) ont fait l'emploi d'un tel processus afin d'enquêter la VI de la performance de gammes (voir figure 3). Dans cette étude, les auteurs comparent les gammes recueillies à une gamme jouée avec une régularité parfaite (c'est-à-dire, qui conserve exactement le même rythme tout au long de l'exécution). Un désavantage de l'étude des IOI est que la déviation rythmique d'une seule note affecte deux intervalles (c'est-à-dire, l' IOI avec la note précédente et avec la note suivante). La méthode d'analyse employée par Van Vugt, Jabusch et Altenmüller corrige ce problème en comparant l'instant où chaque note individuelle est jouée à l'instant où elle serait jouée dans une gamme exécutée avec un rythme parfaite-

ment constant, permettant ainsi de quantifier la déviation rythmique de chaque note individuelle plutôt que les intervalles entre les notes.

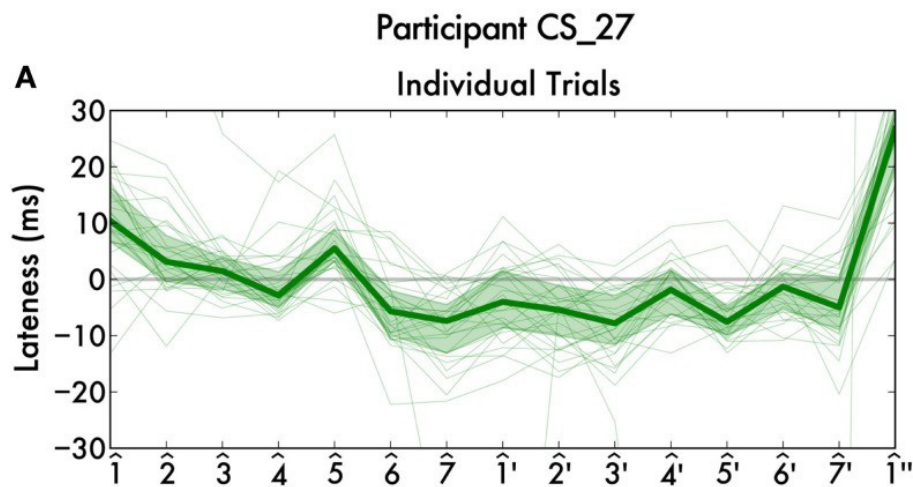


Figure 3 : Déviations rythmiques selon la position de la note dans une gamme. Les lignes fines représentent chaque essai individuel d'un seul participant. La ligne en gras dépeint la médiane de ces essais et la zone ombrée indique l'écart interquartile (Van Vugt, Jabusch et Altenmüller 2012).

Un autre processus permettant de comparer la v_i de variables continues est d'évaluer leur répétabilité (Preatoni *et al.* 2013). Cela est typiquement accompli à l'aide du coefficient de corrélation multiple (CMC) (Kadaba *et al.* 1989) ou du coefficient de corrélation intraclasse (ICC) (Ferber *et al.* 2002). Tout comme le coefficient de correspondance, ces deux mesures renvoient une valeur allant de 0 (aucune répétabilité) à 1 (répétabilité parfaite). Cette revue n'a pas identifié d'études ayant fait usage de ces deux mesures afin d'évaluer la répétabilité. Cependant, Demos, Lisboa et Chaffin (2016) font emploi d'une méthode similaire en comparant le rythme de chaque mesure individuelle à leurs répétitions dans les autres performances afin de créer des scores de stabilité allant de 0 (instable) à 1 (stable). Cette mesure de stabilité offre l'avantage de pouvoir examiner la stabilité à différents niveaux hiérarchiques (par exemple, au niveau de chaque mesure ou au niveau de la performance entière), contrairement à d'autres mesures statistiques traditionnelles, comme la régression multiple et l'analyse de la variance (ANOVA), qui sont limitées à l'analyse d'un seul niveau (voir le matériel supplémentaire de Demos, Lisboa et Chaffin [2016] pour une démonstration de cette mesure). Les auteurs ont pu utiliser cette technique afin de démontrer que le rythme est plus instable en début et en fin de phrase (figure 4).

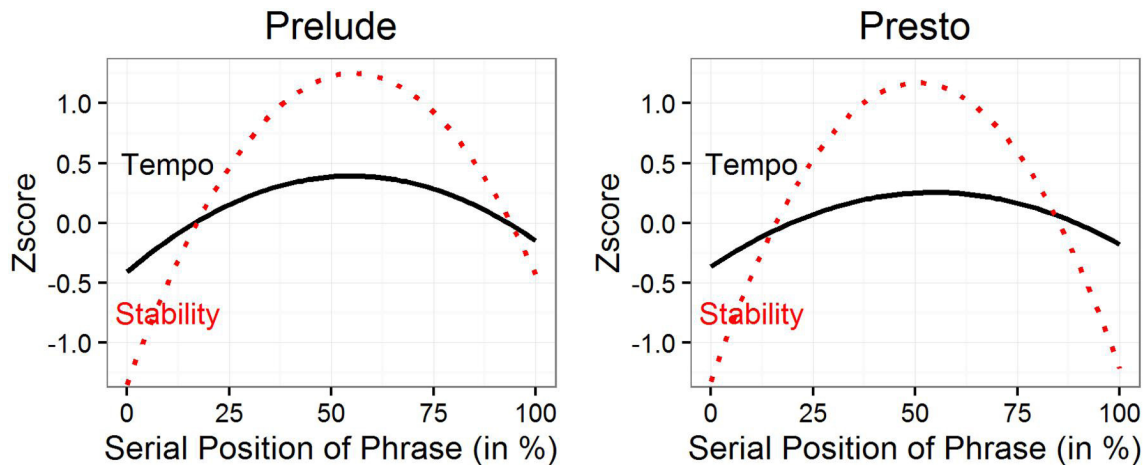


Figure 4 : Tempo et stabilité du rythme (normalisés en scores Z) en fonction de la position sérielle dans une phrase musicale pour douze performances du même interprète du Prélude de la Suite pour violoncelle n° 6 en ré majeur de J.-S. Bach (gauche) et huit performances du même interprète du Presto du Concerto italien de J.-S. Bach (droite) (Demos, Lisboa et Chaffin 2016).

3. Autres mesures

Le potentiel de certaines autres mesures afin d'évaluer la VI du mouvement a été de plus en plus exploré dans les dernières années (Moras *et al.* 2018 ; Preatoni *et al.* 2013 ; Stergiou 2018 ; Walker *et al.* 2019). Ces mesures incluent des mesures d'entropie et l'analyse en composantes principales (*Principal Component Analysis*, PCA). Cette revue a identifié une étude qui a fait l'emploi de la mesure d'entropie de Shannon (1948) afin de quantifier la VI. Keller, Weber et Engel (2011) ont comparé la VI de l'intensité de performances improvisées et de leurs répliques quelques semaines plus tard. Les données démontrent que les performances improvisées présentent plus de fluctuations en matière d'intensité. Ainsi, l'entropie pourrait avoir certaines applications dans le domaine de la performance pianistique, bien qu'une critique de ce genre de mesure soit qu'elle n'offre pas d'information quant à la fonction de la VI du mouvement (Preatoni *et al.* 2013).

Une autre méthode qui peut être observée dans le domaine de la performance pianistique afin de comparer les variables de plusieurs performances est le coefficient de corrélation Pearson. Contrairement aux études du mouvement, les valeurs récoltées dans l'interprétation d'un stimulus musical possèdent un équivalent exact dans les interprétations subséquentes (la même note), permettant ainsi l'emploi d'une mesure comme la corrélation. Cette technique permet donc de calculer, par exemple, la stabilité de l'intensité à l'aide de valeurs MIDI (Ericsson, Krampe et Tesch-Römer 1993) ou du rythme au travers des IOI (Repp 1995b).

En résumé, nous pouvons observer dans la littérature existante l'emploi prédominant de mesures discrètes et continues afin d'évaluer la variabilité de la performance pianistique. De plus, nous pouvons conclure que le choix de mesure dépend du paramètre à l'étude. Bien que le domaine de la biomécanique explore l'usage de nouvelles techniques afin de mesurer la VI du mouvement, ces techniques ne semblent pas avoir été employées dans le domaine de la musique jusqu'à présent, à l'exception de Keller, Weber et Engel (2011) et leur utilisation de l'entropie. Les prochaines enquêtes sur la VI du mouvement

en performance musicale devront par conséquent considérer l'exploration de l'application de ces nouvelles méthodes dans un contexte musical, et envisager l'inclusion de paramètres techniques dans ces enquêtes.

L'influence de l'expertise

Dans le domaine de la performance pianistique, les études conduites jusqu'à présent semblent indiquer que la v_i du mouvement diminue plus le niveau d'expertise augmente. Les prochains paragraphes réviseront ces données dans les deux contextes de la performance pianistique et discuteront de leurs implications.

1. L'expertise et la variabilité dans l'interprétation de morceaux

Ericsson, Krampe et Tesch-Römer (1993) ainsi que Krampe et Ericsson (1996) ont examiné la stabilité de l'intensité chez des amateurs et des experts dans trois performances du *Prélude en do majeur* du *Clavier bien tempéré* de J.-S. Bach. Ericsson, Krampe et Tesch-Römer (1993) ont trouvé un coefficient de corrélation moyen de $r = 0,866$ entre les trois performances des experts, tandis que chez les amateurs, ce coefficient était de $r = 0,695$. Le même phénomène est observé par Krampe et Ericsson (1996) ; une analyse de variance révèle que l'intensité des experts était plus stable que celle des amateurs. Quant au rythme, Repp (1995b) compare les huit premières mesures de *Träumerei* de Robert Schumann à leur répétition plus tard dans le même morceau chez des pianistes professionnels et des pianistes aux études supérieures. Cette analyse révèle des coefficients de corrélation moyens similaires entre les professionnels ($r = 0,842$) et les étudiants ($r = 0,899$), ce qui suggère qu'après un certain point, la v_i cesse de diminuer de manière significative. Cependant, il est important de noter qu'il s'agit ici de répétitions à l'intérieur d'une même performance et qu'il est donc possible que les pianistes aient délibérément altéré leurs interprétations de ces répétitions à des fins artistiques. En matière de régularité, Salmon et Newark (1997) trouvent des résultats similaires chez trois pianistes, où la régularité de l'intensité, de l'articulation et du rythme augmentait selon le niveau d'expertise.

2. L'expertise et la variabilité dans l'exécution d'exercices techniques

L'étude de la relation entre l'expertise et la variabilité dans l'exécution d'exercices techniques s'est surtout concentrée sur la régularité. Wagner, Piontek et Teckhaus (1973) ont examiné la régularité rythmique dans la performance de gammes de *do* majeur chez trois pianistes possédant différents niveaux d'expertise. Leur analyse révèle une augmentation considérable de la régularité plus le niveau d'expertise du pianiste était élevé. Ce phénomène sera corroboré à plusieurs occasions par la suite. Dans une étude chez des enfants âgés de 8 à 17 ans, Jabusch, Yong et Altenmüller (2007) trouvent une corrélation entre une mesure individuelle qualifiant l'irrégularité rythmique (voir le document original pour plus de détails concernant cette mesure et la manière dont elle est calculée) et le temps de répétition quotidien ($r = -0,45$), le temps de répétition total accumulé ($r = -0,46$) et la durée de l'éducation musicale au piano ($r = -0,41$). Dans une étude subséquente chez des pianistes avancés, Jabusch et collègues (2009) comparent la régularité rythmique lors de deux séances séparées

par une durée moyenne de 27 mois. Une corrélation fut trouvée entre la même mesure individuelle d'irrégularité rythmique lors de la première séance et le temps de répétition total accumulé à ce moment ($r = -0,47$). Lorsque la différence entre les mesures d'irrégularité rythmique des deux séances a été analysée, une corrélation a été trouvée entre cette différence et le temps de répétition accumulé entre ces deux séances ($r = -0,68$), ainsi que le temps de répétition quotidien durant cette période ($r = -0,60$). Ces données indiquent que les participants ayant accumulé le plus de répétition entre les deux séances ont démontré la plus grande augmentation de régularité lors de la seconde séance. Enfin, Jabusch et collègues (2009) notent que, lorsque comparée aux enfants étudiés dans leur étude précédente (Jabusch, Yong et Altenmüller 2007), la VI des adultes était moins importante. Une limitation de cette comparaison, toutefois, est que les gammes jouées par les enfants étaient exécutées à un tempo moins rapide.

Tant au niveau des morceaux que des exercices techniques, peu d'information existe quant à la relation entre l'expertise et la VI des paramètres autres que le rythme et l'intensité, ainsi qu'avec la stabilité de la performance de gammes. De plus, puisque la VI des paramètres techniques chez les pianistes est, à ce jour, sous-étudiée, sa relation avec l'expertise est tout aussi incertaine. Néanmoins, les données récoltées jusqu'à présent pointent vers la conclusion selon laquelle une grande expertise diminue la VI de certains paramètres de la performance pianistique. Cette conclusion contribue à la discussion sur l'expertise et sa définition en tant qu'habileté à produire un résultat prédéterminé avec un fort degré de certitude (Bashford *et al.* 2022 ; Komar, Seifert et Thouvarecq 2015).

Déterminer le nombre d'essais minimal afin d'obtenir une évaluation stable

Bien qu'une multitude d'études dans le domaine de la performance pianistique fassent l'emploi de protocoles avec plusieurs essais, cette revue n'a pas identifié de documents dont le but principal était d'évaluer le nombre d'essais minimal afin d'obtenir une évaluation fiable. Il n'est donc pas possible pour le moment d'arriver à des conclusions définitives quant aux nombres d'essais appropriés. Les prochains paragraphes offrent certaines recommandations basées sur les informations actuelles disponibles dans la documentation.

1. Le nombre d'essais minimal dans l'interprétation de morceaux

La majorité des études contenues dans cette revue ayant examiné l'interprétation de morceaux ont demandé aux participants de jouer ces morceaux à trois reprises (tableau 4). Un thème principal ressortant de cette revue est la stabilité considérable de la performance pianistique, particulièrement du rythme. En effet, plusieurs études ont démontré que le rythme semble être le paramètre le plus stable de la performance pianistique. Une analyse du rythme entre plusieurs répétitions des huit premières mesures de *Träumerei* par Repp (1995b) et Penel et Drake (1998) révèle des coefficients de corrélation moyens de $r = 0,907$ et $r = 0,89$, respectivement. Lorsque le rythme des performances entières est analysé, et non seulement les huit premières mesures, le coefficient de corrélation moyen atteint $r = 0,947$ (Repp 1995b).

Repp (1997b) trouve également un écart type moyen de seulement 1,2 bpm (*beats per minute*) entre trois performances de *La fille aux cheveux de lin* de Claude Debussy données par les mêmes pianistes avancés. Un résultat similaire est observé par Palmer (1996) qui calcule un coefficient de corrélation de $r = 0,93$ entre deux répétitions de huit mesures de la *Sonate pour piano n° 4 en mi bémol majeur*, K. 282, de Mozart chez un pianiste professionnel.

Bien que l'intensité semble être moins bien répliquée d'interprétation en interprétation que le rythme, celle-ci demeure tout de même particulièrement stable. Dans une autre étude examinant trois performances de *Träumerei* jouées par des pianistes aux études supérieures, Repp (1996c) observe un coefficient de corrélation moyen de l'intensité de $r = 0,836$. Dans la même étude ayant calculé un coefficient de corrélation de $r = 0,93$ entre le rythme de deux répétitions de la Sonate K. 282 de Mozart, Palmer (1996) remarque que son équivalent pour l'intensité n'atteint que $r = 0,81$. Ericsson, Krampe et Tesch-Römer (1993) trouvent quant à eux un coefficient de corrélation moyen de $r = 0,866$ entre trois interprétations du *Prélude en do majeur* de J.-S. Bach données par 12 pianistes avancés. Chez 12 pianistes amateurs, ce coefficient était plutôt de $r = 0,695$.

Pour ce qui a trait aux pianistes avancés, il pourrait être facile de conclure, à partir de ces données, que la performance pianistique est si stable que la collecte d'une seule performance pourrait suffire. Cependant, la collecte d'un seul essai pose le risque de l'évaluation d'un essai qui n'est pas représentatif de la performance habituelle d'un participant, ce qui pourrait mener à des conclusions erronées (Bates, Dufek et Davis 1992). Ce risque paraît plus évident lorsque l'on constate l'absence d'information quant à la variabilité des paramètres de la performance pianistique au-delà du rythme et de l'intensité. En particulier, la v_i de l'articulation demeure particulièrement nébuleuse. Quant à l'utilisation de la pédale, Heinlein (1929) remarque une étendue de la fréquence d'utilisation de la pédale allant jusqu'à 21 entre deux répétitions d'un même morceau. Repp (1996a), quant à lui, remarque une étendue maximale de 16 entre trois répétitions. Ces données soutiennent donc la conclusion selon laquelle utiliser la moyenne de plusieurs essais diminue le risque de conduire des analyses sur une performance atypique. Toutefois, à l'heure actuelle, il n'est pas possible de conclure quel nombre d'essais est approprié, particulièrement pour les études examinant la performance d'amateurs. En biomécanique clinique, Mullineaux, Bartlett et Bennett (2001) recommandent l'emploi de la moyenne d'au moins trois essais en tant que compromis entre les enjeux statistiques et la praticité de l'implémentation, ce qui pourrait servir de ligne directrice pour le moment. Le raisonnement et les implications statistiques derrière cette recommandation peuvent être retrouvés dans leur document.

Il est toutefois nécessaire de souligner que le nombre d'essais minimal pourrait être plus élevé chez les amateurs. Comme souligné dans les paragraphes précédents, les amateurs démontrent une v_i plus importante – du moins au niveau du rythme et de l'intensité –, ce qui exacerbe le risque de recueillir une interprétation qui n'est pas représentative de leur performance habituelle et est typiquement réglée par l'emploi d'un plus grand nombre d'essais. De surcroît, il est difficile d'arriver à une conclusion définitive quant au nombre d'essais minimal pour une population d'amateurs.

Nombre de répétitions	2	3	4	7	8	10	11	12	72
Nombre d'études	3	15	2	2	2	1	2	1	1

Tableau 4 : Nombre de répétitions employées par les études retenues pour cette revue dans le contexte d'interprétation de morceaux.

Nombre de répétitions	1	3	5	10-15	20	30
Nombre d'études	2	1	1	8	1	3

Tableau 5 : Nombre de répétitions employées par les études retenues pour cette revue dans le contexte d'exécution d'exercices techniques.

2. Le nombre d'essais minimal dans l'exécution d'exercices techniques

La majorité des études contenues dans cette revue ont examiné la régularité et la stabilité de la performance d'exercices techniques à l'aide de 10-15 répétitions par condition (voir tableau 5), quoique certaines études récentes ont plutôt conduit leurs analyses sur des séquences d'environ 30 gammes ([Van Vugt, Jabusch et Altenmüller 2012](#) ; [Van Vugt et Altenmüller 2019](#) ; [Vaquero et al. 2016](#)). Parmi toutes ces études, seulement quelques-unes ont examiné la stabilité de la performance d'exercices techniques.

Van Vugt, Jabusch et Altenmüller ([2013](#)) ont examiné la stabilité lors de deux séances séparées par une quinzaine de minutes. Afin de comparer les performances, les auteurs ont mesuré la distance euclidienne entre les profils de déviations rythmiques moyens des performances intra-individuelles et inter-individuelles. Le résultat principal de cette analyse révèle que les profils sont plus semblables entre deux performances d'un même pianiste qu'entre deux performances de pianistes différents. Ce processus fut répété sur les données longitudinales recueillies par Jabusch et collègues ([2009](#)) et, encore une fois, les profils du même pianiste étaient en général considérablement plus similaires que les profils de différents pianistes. Ces données démontrent qu'il existe une stabilité particulièrement impressionnante lors de la performance de gammes, d'autant plus que dans le cadre de la même étude, des auditeurs ne sont pas arrivés à correctement identifier si ces paires de gammes étaient jouées par le même pianiste ou des pianistes différents. De ce fait, les différences entre les profils de déviations rythmiques sont si minces qu'elles sont imperceptibles, mais demeurent assez prononcées à un niveau microscopique afin de permettre de distinguer différents pianistes. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Michaud, Begon et Duprey ([2022](#)) dans une étude portant sur la variabilité de paramètres techniques chez des violinistes avancés, où les auteurs ont remarqué des profils de performance hautement individuels à chaque interprète. Ce phénomène semble donc être présent chez différents instrumentalistes.

En tout, ces résultats suggèrent que la collecte d'un seul essai pourrait suffire, puisque les données semblent indiquer que, chez les pianistes avancés, l'exécution d'exercices techniques est particulièrement stable. Cependant, les enjeux liés à la stabilité de la performance de gammes sont les mêmes que pour la performance de morceaux. La collecte d'un seul essai entraîne le risque d'évaluer une performance non représentative d'un participant ([Bates, Dufek et Davis 1992](#)). De plus, il existe peu

d'information quant à la stabilité des paramètres autres que le rythme. De ce fait, il est difficile de conclure quel nombre d'essais est approprié afin d'obtenir une évaluation fiable. Il est bien possible que la recommandation de Mullineaux, Bartlett et Bennett (2001), consistant à utiliser un protocole avec au moins trois essais, soit suffisante. Cependant, puisqu'il est assez facile d'enchaîner plusieurs gammes consécutives, il est plus prudent d'utiliser un protocole avec au moins une dizaine de répétitions par condition, comme le font la majorité des études retenues par cette revue. Les chercheurs voulant, par précaution, employer une approche plus prudente peuvent quant à eux utiliser un protocole avec une trentaine de répétitions par condition lorsque le contexte de la recherche et de la population à l'étude le permet. Enfin, tout comme dans l'interprétation de morceaux, il est possible que le nombre d'essais minimal approprié pour les pianistes amateurs soit plus élevé puisque ces derniers démontrent une variabilité plus importante lors de la performance de gammes.

Pour conclure, les données présentes dans la littérature existante quant au nombre d'essais minimal afin d'obtenir une évaluation fiable de la performance pianistique sont insuffisantes afin d'arriver à une conclusion. De ce fait, nous offrons la recommandation d'utiliser la moyenne d'au moins trois essais dans le cadre de morceaux et d'au moins dix essais dans le cadre d'exercices techniques. Ces recommandations sont basées sur la recherche de Mullineaux, Bartlett et Bennett (2001) dans le domaine de la biomécanique. Les futures enquêtes sur la *vi* du mouvement en performance musicale devront davantage explorer cet enjeu, en employant l'une des multiples méthodes qui permettent de déterminer le nombre d'essais approprié (Caldwell *et al.* 1998 ; Hamill et McNiven 1990 ; Salo et Grimshaw 1998). Pour de plus amples informations à ce sujet, voir Bates, Dufek et Davis (1992), Mullineaux, Bartlett et Bennett (2001) ainsi que Preatoni et collègues (2013).

Tableaux récapitulatifs

Les tableaux récapitulatifs suivants visent à résumer et à présenter toutes les informations reliées à la *vi* du mouvement en performance pianistique qui ont été présentées dans la documentation jusqu'à présent, d'abord dans le cadre d'interprétation de morceaux (tableau 6), puis dans le cadre de l'exécution d'exercices techniques (tableau 7). Certaines de ces informations ont été abordées dans les sections précédentes.

Paramètre	Phénomènes observés		
	Généraux	En lien à l'expertise	En lien à la durée séparant les répétitions
<i>La présence d'erreurs</i>	<ul style="list-style-type: none"> La présence d'erreurs varie même chez des pianistes avancés (Chaffin, Lemieux et Chen 2007 ; Repp 1996b) 	<ul style="list-style-type: none"> Les novices font plus d'erreurs et commettent des types d'erreurs différents que les experts (Drake et Palmer 2000 ; Krampe et Ericsson 1996) 	
<i>L'intensité</i>	<ul style="list-style-type: none"> L'intensité des notes jouées avec la main droite est plus stable que l'intensité des notes jouées avec la main gauche (Repp 1996c) 	<ul style="list-style-type: none"> La régularité et la stabilité de l'intensité augmentent avec le niveau d'expertise (Ericsson et Tesch-Römer 1993 ; Krampe et Ericsson 1996 ; Salmon et Newmark 1989) 	<ul style="list-style-type: none"> Chez des pianistes avancés, l'intensité est très stable entre plusieurs performances d'un même morceau à court terme (Repp 1996c)
<i>L'articulation</i>		<ul style="list-style-type: none"> L'irrégularité de l'articulation est plus prononcée chez les amateurs (Salmon et Newmark 1989) 	
<i>L'utilisation de la pédale forte</i>	<ul style="list-style-type: none"> L'utilisation de la pédale forte varie même chez des pianistes avancés (Heinlein 1929 ; Repp 1996a) 		
<i>Le rythme</i>	<ul style="list-style-type: none"> Les débuts et fins de phrase sont moins stables que les milieux de phrase (Demos, Lisboa et Chaffin 2016) Même sur des performances motrices hautement automatisées, les pianistes conservent un contrôle conscient sur le rythme qu'ils adoptent, majoritairement à des fins expressives (Chaffin, Lemieux et Chen 2006, 2007 ; Chaffin et Logan, 2006 ; Clarke, 1982, 1985) L'instabilité augmente avec le tempo (Clarke 1982) Les performances mécaniques (sans expression) sont plus régulières (Drake et Palmer 1993 ; Penel et Drake 1998) Plus la valeur d'un IOI est grande, plus cet IOI est instable au cours de plusieurs interprétations (Repp 1997d, 1999) Le profil rythmique est mieux répliqué que le profil d'intensité entre plusieurs interprétations (Windsor et Clarke 1997) 	<ul style="list-style-type: none"> La stabilité du rythme de pianistes avancés (étudiants universitaires) est comparable à celle de pianistes professionnels (Repp 1995b) La régularité et la stabilité du rythme augmentent avec l'expertise (Salmon et Newmark 1989) 	<ul style="list-style-type: none"> Chez des pianistes avancés, le rythme est très stable entre plusieurs performances d'un même morceau à court terme (Clarke 1985 ; Penel et Drake 1998 ; Repp 1995b, 1999 ; Shaffer 1981) et à moyen terme (Chaffin, Lemieux et Chen 2007)

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des phénomènes observés jusqu'à présent concernant la variabilité de paramètres de la performance pianistique lors de l'interprétation de morceaux. La stabilité se veut la variabilité entre les répétitions d'un stimulus, tandis que la régularité est la variabilité au sein d'une seule interprétation d'un stimulus.

Paramètre	Phénomènes observés		
	Généraux	En lien à l'expertise	En lien à la durée séparant les répétitions
<i>L'intensité</i>	<ul style="list-style-type: none"> La régularité de l'intensité est influencée par le tempo (MacKenzie et Van Eerd 1990) L'intensité des notes jouées avec la main droite est plus régulière que l'intensité des notes jouées avec la main gauche (Van Vugt <i>et al.</i> 2013) La régularité de l'intensité est influencée par le chronotype du pianiste (Van Vugt <i>et al.</i> 2013) La régularité diminue plus l'avant-bras est affecté par la fatigue musculaire (Goubault <i>et al.</i> 2021) 		
<i>L'articulation</i>	<ul style="list-style-type: none"> L'articulation varie grandement entre différents pianistes (Repp 1995a) Il existe une corrélation positive entre le KOT moyen d'un pianiste et l'irrégularité des KOTs (Repp 1997c) 		
<i>Le rythme</i>	<ul style="list-style-type: none"> Il n'existe pas de différence en matière de régularité entre les pianistes gauchers et droitiers (Kopiez <i>et al.</i> 2012) La régularité est influencée par certains facteurs biomécaniques (Lipke-Perry, Dutto et Levy 2019 ; Van Vugt <i>et al.</i> 2014) et certains facteurs expressifs (Van Vugt <i>et al.</i> 2014) La régularité du rythme est influencée par le tempo (MacKenzie et Van Eerd 1990 ; Van Vugt <i>et al.</i> 2014 ; Wagner 1971) Le rythme des notes jouées avec la main droite est plus régulier que le rythme des notes jouées avec la main gauche (Kopiez <i>et al.</i> 2012 ; MacKenzie et Van Eerd 1990 ; Van Vugt <i>et al.</i> 2013 ; Van Vugt et Altenmuller 2019) La régularité du rythme est influencée par le chronotype du pianiste (Van Vugt <i>et al.</i> 2013) 	<ul style="list-style-type: none"> L'irrégularité rythmique est plus prononcée chez les enfants (8-17 ans) que les adultes (Jabusch, Yong et Altenmüller 2007 ; Jabusch <i>et al.</i> 2009) L'irrégularité rythmique diminue plus le temps de répétition accumulé est élevé (Jabusch, Yong et Altenmüller 2007 ; Jabusch <i>et al.</i> 2009 ; Kopiez <i>et al.</i> 2012 ; Wagner, Piontek et Teckhaus 1973). L'irrégularité rythmique est moins prononcée chez les pianistes ayant commencé les leçons avant l'âge de 7 ans (Vaquero <i>et al.</i> 2016) 	<ul style="list-style-type: none"> Chez des pianistes avancés, la régularité rythmique est particulièrement stable à court terme (Van Vugt, Jabusch, et Altenmüller 2013) et à très long terme (plus d'un an) (Jabusch <i>et al.</i> 2009 ; Van Vugt, Jabusch et Altenmüller 2013)

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des phénomènes observés jusqu'à présent concernant la variabilité de paramètres de la performance pianistique lors de l'exécution d'exercices techniques. La stabilité se veut la variabilité entre les répétitions d'un stimulus, tandis que la régularité est la variabilité au sein d'une seule interprétation d'un stimulus.

CONCLUSION

La performance pianistique est, tout comme les activités sportives, sujette à varier de répétition en répétition en raison de la *vi* du mouvement. Cette revue exploratoire a pu déterminer une multitude de facteurs clés jouant un rôle dans l'étude de la *vi* du mouvement en performance pianistique, qu'il s'agisse du paramètre étudié, du contexte de la performance, du type de *vi* ou de l'expertise. En rassemblant la documentation existante en un seul document, il a été possible d'identifier les thèmes pertinents et d'émettre certaines recommandations méthodologiques. Ensemble, ces éléments pourront servir de tremplin pour les études futures portant sur le phénomène de la *vi* du mouvement en performance pianistique et plus généralement en performance musicale.

L'étude de la *vi* dans des contextes sportifs et musicaux demeure un phénomène récent, mais dont l'importance ne peut être sous-estimée compte tenu de ses bénéfices potentiels. Cette revue fait partie des premiers pas dans la recherche sur la *vi* du mouvement en performance pianistique et démontre qu'il s'agit d'un domaine qui mérite de recevoir plus d'attention et qui pourrait mener à l'implémentation d'une multitude de mesures qui bénéficieront tant aux pianistes qu'aux chercheurs.

BIBLIOGRAPHIE²

- Ajero, Mario (2007), *The Effects of Computer-assisted Keyboard Technology and MIDI Accompaniments on Group Piano Students' Performance Accuracy and Attitudes*, thèse de doctorat, The University of Oklahoma, www.proquest.com/openview/b3e037b8c257d258a3aa71b499c27c0a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750.
- Aoki, Tomoko, Shinichi Furuya, et Hiroshi Kinoshita (2005), « Finger-Tapping Ability in Male and Female Pianists and Nonmusician Controls », *Motor Control*, vol. 9, n° 1, p. 23-39, <https://doi.org/10.1123/mcj.9.1.23>.
- Arksey, Hilary, et Lisa O'Malley (2005), « Scoping Studies. Towards a Methodological Framework », *International Journal of Social Research Methodology*, vol. 8, n° 1, p. 19-32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>.
- Arutyunyan, G. A., Gurfinkel' V. S., et M. L. Mirskii (1968), « Investigation of Aiming at a Target », *Biophysics*, vol. 13, n° 3, p. 536-538.
- Bartlett, Roger, Jon Wheat, et Matthew Robins (2007), « Is Movement Variability Important for Sports Biomechanists? », *Sports Biomechanics*, vol. 6, n° 2, p. 224-243, <https://doi.org/10.1080/14763140701322994>.
- Bashford, Luke, *et al.* (2022), « Motor Skill Learning Decreases Movement Variability and Increases Planning Horizon », *Journal of Neurophysiology*, vol. 127, n° 4, p. 995-1006, <https://doi.org/10.1152/jn.00631.2020>.
- Bates, Barry T., Janet S. Dufek, et Howard P. Davis (1992), « The Effect of Trial Size on Statistical Power », *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 24, n° 9, p. 1059-1065, <http://dx.doi.org/10.1249/00005768-199209000-00017>.
- Bernstein, N. A. (1967), *The Co-ordination and Regulation of Movements*, Oxford/New York, Pergamon Press.

2 Tous les hyperliens ont été vérifiés le 21 septembre 2022.

- Bradshaw, Elizabeth, *et al.* (2010), « Reliability and Variability of Day-to-day Vault Training Measures in Artistic Gymnastics », *Sports Biomechanics*, vol. 9, n° 2, p. 79-97, <https://doi.org/10.1080/14763141.2010.488298>.
- Bresin, Roberto, et Giovanni Umberto Battel (2000), « Articulation Strategies in Expressive Piano Performance Analysis of Legato, Staccato, and Repeated Notes in Performances of the Andante Movement of Mozart's Sonata in G Major (K 545) », *Journal of New Music Research*, vol. 29, n° 3, p. 211-224, <http://dx.doi.org/10.1076/jnmr.29.3.211.3092>.
- Caballero, Carla, *et al.* (2017), « The Role of Motor Variability in Motor Control and Learning Depends on the Nature of the Task and the Individual's Capabilities / El Rol De La Variabilidad Motora en El Control Y Aprendizaje Motor depende De Las Características De La Tarea Las Capacidades Individuales », *Motricidad. European Journal of Human Movement*, vol. 38, p. 12-26.
- Caldwell, Graham E., Li Li, Steve D. McCole, et James M. Hagberg (1998), « Pedal and Crank Kinetics in Uphill Cycling », *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 14, n° 3, p. 245-259, <https://doi.org/10.1123/jab.14.3.245>.
- *Chaffin, Roger, Gabriela Imreh, et Mary Crawford (2002), *Practicing Perfection. Memory and Piano Performance*, New York, Psychology Press, <https://doi.org/10.4324/9781410612373>.
- *Chaffin, Roger, Anthony F. Lemieux, et Colleen Chen (2006), « Spontaneity and Creativity in Highly Practised Performance », dans Irène Deliège et Geraint A. Wiggins (dir.), *Musical Creativity. Multidisciplinary Research in Theory and Practice*, London, Psychology Press, p. 200-218.
- *Chaffin, Roger, Anthony F. Lemieux, et Colleen Chen (2007), « "It is Different Each Time I Play". Variability in Highly Prepared Musical Performance », *Music Perception*, vol. 24, n° 5, p. 455-472, <https://doi.org/10.1525/mp.2007.24.5.455>.
- *Chaffin, Roger, et Topher Logan (2006), « Practicing Perfection. How Concert Soloists Prepare for Performance », *Advances in Cognitive Psychology*, vol. 2, n° 2-3, p. 113-130, <https://psycnet.apa.org/doi/10.2478/v10053-008-0050-z>.
- Chapman, Andrew, *et al.* (2009), « Do Differences in Muscle Recruitment between Novice and Elite Cyclists Reflect Different Movement Patterns or Less Skilled Muscle Recruitment? », *Journal of Science and Medicine in Sport*, vol. 12, n° 1, p. 31-34, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsams.2007.08.012>.
- Chau, Tom, et Kim Parker (2004), « On the Robustness of Stride Frequency Estimation », *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, n° 2, p. 294-303, <https://doi.org/10.1109/tbme.2003.820396>.
- Chau, Tom, Scott Young, et Sue Redekop (2005), « Managing Variability in the Summary and Comparison of Gait Data », *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 2, article 22, <https://doi.org/10.1186/2F1743-0003-2-22>.
- *Cheng, Felicia Pei-Hsin, Michael Grossbach, et Eckart Altenmüller (2013), « Altered Sensory Feedbacks in Pianist's Dystonia. The Altered Auditory Feedback Paradigm and the Glove Effect », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, article 868, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00868>.
- Churchland, Mark M., Afsheen Afshar, et Krishna V. Shenoy (2006), « A Central Source of Movement Variability », *Neuron*, vol. 52, n° 6, p. 1085-1096, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.10.034>.
- *Clarke, Eric F. (1982), « Timing in the Performance of Erik Satie's 'Vexations' », *Acta Psychologica*, vol. 50, n° 1, p. 1-19, [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(82\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(82)90047-6).
- *Clarke, Eric F. (1985), « Some Aspects of Rhythm and Expression in Performances of Erik Satie's "Gnosienne No. 5" », *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, vol. 2, n° 3, p. 299-328, <http://dx.doi.org/10.2307/40285301>.
- Davids, Keith, *et al.* (2003), « Movement Systems as Dynamical Systems. The Functional Role of Variability and its Implications for Sports Medicine », *Sports Medicine*, vol. 33, n° 4, p. 245-260, <https://doi.org/10.2165/00007256-200333040-00001>.
- Davis, Peter Lowell (2001), *A Descriptive Analysis of Dynamic (Loudness) Accuracy Test Scores for College Non-keyboard Music Majors in Group Piano Classes Who Practiced with Four Types of MIDI Accompaniment*, thèse de doctorat, The University of Oklahoma, <https://shareok.org/handle/11244/6060>.

- *Demos, Alexander P., Tânia Lisboa, et Roger Chaffin (2016), « Flexibility of Expressive Timing in Repeated Musical Performances », *Frontiers in Psychology*, vol. 7, article 1490, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01490>.
- *Drake, Carolyn, et Caroline Palmer (1993), « Accent Structures in Music Performance », *Music Perception. An Interdisciplinary Journal*, vol. 10, n° 3, p. 343-378, <http://dx.doi.org/10.2307/40285574>.
- *Drake, Carolyn, et Caroline Palmer (2000), « Skill Acquisition in Music Performance. Relations between Planning and Temporal Control », *Cognition*, vol. 74, n° 1, p. 1-32, [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00061-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00061-X).
- *Ericsson, K. Anders, Ralf Th. Krampe, et Clemens Tesch-Römer (1993), « The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance », *Psychological Review*, vol. 100, n° 3, p. 363-406, <http://dx.doi.org/10.1037//0033-295X.100.3.363>.
- Ferber, R., *et al.* (2002), « A Comparison of Within- and Between-day Reliability of Discrete 3D Lower Extremity Variables in Runners », *Journal of Orthopaedic Research. Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, vol. 20, n° 6, p. 1139-1145, [https://doi.org/10.1016/s0736-0266\(02\)00077-3](https://doi.org/10.1016/s0736-0266(02)00077-3).
- Flückiger, Matthias, Tobias Grosshauser, et Gerhard Tröster (2018), « Influence of Piano Key Vibration Level on Players' Perception and Performance in Piano Playing », *Applied Sciences*, vol. 8, n° 12, article 2697, <http://dx.doi.org/10.3390/app8122697>.
- Furuya, Shinichi, *et al.* (2011), « Distinct Inter-Joint Coordination during Fast Alternate Keystrokes in Pianists with Superior Skill », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 5, article 50, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00050>.
- Furuya, Shinichi, et Hiroshi Kinoshita (2008a), « Expertise-dependent Modulation of Muscular and Non-muscular Torques in Multi-joint Arm Movements during Piano Keystroke », *Neuroscience*, vol. 156, n° 2, p. 390-402, <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2008.07.028>.
- Furuya, Shinichi, et Hiroshi Kinoshita (2008b), « Organization of the Upper Limb Movement for Piano Key-depression Differs between Expert Pianists and Novice Players », *Experimental Brain Research*, vol. 185, n° 4, p. 581-593, <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1184-9>.
- Glazier, Paul S., et Keith Davids (2009), « On Analysing and Interpreting Variability in Motor Output », *Journal of Science and Medicine in Sport*, vol. 12, n° 4, p. e2-e3, <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.03.010>.
- *Goubault, Etienne, *et al.* (2021), « Exhausting Repetitive Piano Tasks Lead to Local Forearm Manifestation of Muscle Fatigue and Negatively Affect Musical Parameters », *Scientific Reports*, vol. 11, article 8117, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87403-8>.
- Hamill, Joseph, et Susan L. McNiven (1990), « Reliability of Selected Ground Reaction Force Parameters during Walking », *Human Movement Science*, vol. 9, n° 2, p. 117-131, [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(90\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0167-9457(90)90023-7).
- Harris, Christopher M., et Daniel M. Wolpert (1998), « Signal-dependent Noise Determines Motor Planning », *Nature*, vol. 394, n° 6695, p. 780-784, <https://doi.org/10.1038/29528>.
- *Heinlein, Christian Paul (1929), « A Discussion of the Nature of Pianoforte Damper-Pedalling Together with an Experimental Study of Some Individual Differences in Pedal Performance », *The Journal of General Psychology*, vol. 2, n° 4, p. 489-508, <https://doi.org/10.1080/00221309.1929.9918087>.
- Henley, Paul Thomas (1999), *The Effect of Modeling and Tempo Gradations as Practice Techniques on the Performance of High School Instrumentalists*, thèse de doctorat, Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.
- Huang, Jinyan, et Chandra J. Foote (2011), « Using Generalizability Theory to Examine Scoring Reliability and Variability of Judging Panels in Skating Competitions », *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, vol. 7, n° 3, article 16, <https://doi.org/10.2202/1559-0410.1241>.
- Ichihara, Takuya, et Nobuyuki Inui (2001), « Independence of Timing and Force Control during Finger-tapping Sequences by Pianists », *Perceptual and Motor Skills*, vol. 93, n° 2, p. 556-558, <https://doi.org/10.2466/pms.2001.93.2.556>.

- *Jabusch, Hans-Christian, *et al.* (2009), « The Influence of Practice on the Development of Motor Skills in Pianists. A Longitudinal Study in a Selected Motor Task », *Human Movement Science*, vol. 28, n° 1, p. 74-84, <https://doi.org/10.1016/j.humov.2008.08.001>.
- *Jabusch, Hans-Christian, Henning Vauth, et Eckart Altenmüller (2004), « Quantification of Focal Dystonia in Pianists Using Scale Analysis », *Movement Disorders. Official Journal of the Movement Disorder Society*, vol. 19, n° 2, p. 171-180, <https://doi.org/10.1002/mds.10671>.
- *Jabusch, Hans-Christian, Raymond M. Yong, et Eckart Altenmüller (2007), « Biographical Predictors of Music-related Motor Skills in Children Pianists », dans Aaron Williamon et Daniela Coimbra (dir.) *Proceedings of the International Symposium on Performance Science 2007*, Utrecht, European Association of Conservatoires (AEC), p. 363-368.
- Jacobs, J. Pieter, et Daniel Bullock (1998), « A Two-process Model for Control of Legato Articulation across a Wide Range of Tempos during Piano Performance », *Music Perception. An Interdisciplinary Journal*, vol. 16, n° 2, p. 169-199, <https://doi.org/10.2307/40285786>.
- Kadaba, Murali P., *et al.* (1989), « Repeatability of Kinematic, Kinetic, and Electromyographic Data in Normal Adult Gait », *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 7, n° 6, p. 849-860, <https://doi.org/10.1002/jor.1100070611>.
- Kadota, Hiroshi, *et al.* (2010), « An fMRI Study of Musicians with Focal Dystonia during Tapping Tasks », *Journal of Neurology*, vol. 257, n° 7, p. 1092-1098, <https://doi.org/10.1007/s00415-010-5468-9>.
- Karamanidis, Kiros, Adamantios Arampatzis, et Gert-Peter Brüggemann (2003), « Symmetry and Reproducibility of Kinematic Parameters during Various Running Techniques », *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 35, n° 6, p. 1009-1016, <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000069337.49567.f0>.
- *Keller, Peter E., Andreas Weber, et Annerose Engel (2011), « Practice Makes Too Perfect. Fluctuations in Loudness Indicate Spontaneity in Musical Improvisation », *Music Perception. An Interdisciplinary Journal*, vol. 29, n° 1, p. 109-114, <http://dx.doi.org/10.1525/mp.2011.29.1.109>.
- Komar, John, Ludovic Seifert, et Régis Thouwarecq (2015), « What Variability Tells Us about Motor Expertise. Measurements and Perspectives from a Complex System Approach », *Movement Sport Sciences*, vol. 89, n° 3, p. 65-77, <http://dx.doi.org/10.1051/sm/2015020>.
- *Kopiez, Reinhard, *et al.* (2012), « No Disadvantage for Left-handed Musicians. The Relationship between Handedness, Perceived Constraints and Performance-related Skills in String Players and Pianists », *Psychology of Music*, vol. 40, n° 3, p. 357-384, <https://psycnet.apa.org/doi/10.1177/0305735610394708>.
- Krampe, Ralf Th. (1994), *Maintaining Excellence. Cognitive-motor Performance in Pianists Differing in Age and Skill Level*, Berlin, Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- *Krampe, Ralf Th., et K. Anders Ericsson (1996), « Maintaining Excellence. Deliberate Practice and Elite Performance in Young and Older Pianists », *Journal of Experimental Psychology. General*, vol. 125, n° 4, p. 331-359, <https://doi.org/10.1037//0096-3445.125.4.331>.
- Latash, Mark L., John P. Scholz, et Gregor Schöner (2002), « Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability », *Exercise and Sport Sciences Reviews*, vol. 30, n° 1, p. 26-31, <https://doi.org/10.1097/00003677-200201000-00006>.
- Levac, Danielle, Heather Colquhoun, et Kelly K. O'Brien (2010), « Scoping Studies. Advancing the Methodology », *Implementation Science*, vol. 5, article 69, <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>.
- *Lipke-Perry, Tracy, Darren J. Dutto, et Morris Levy (2019), « The Piano Keyboard as Task Constraint. Timing Patterns of Pianists' Scales Persist Across Instruments », *Music & Science*, vol. 2, <https://doi.org/10.1177/2059204319870733>.
- Loria, Tristan, *et al.* (2022), « The Impact of Limb Velocity Variability on Mallet Accuracy in Marimba Performance », *Journal of Motor Behavior*, <https://doi.org/10.1080/00222895.2022.2069080>.

- Mack, Melanie, *et al.* (2020), « Movement Prototypes and Their Relationship in the Performance of a Gymnastics Floor Routine », *Journal of Human Sport & Exercise*, vol. 15, n° 2, p. 303-318, <http://dx.doi.org/10.14198/jhse.2020.152.06>.
- *MacKenzie, Christine L., *et al.* (1986), « The Effect of Tonal Structure on Rhythm in Piano Performance », *Music Perception. An Interdisciplinary Journal*, vol. 4, n° 2, p. 215-225, <https://doi.org/10.2307/40285361>.
- MacKenzie, Christine L., Judith A. Nelson-Schultz, et Barry L. Wills (1983), « A Preliminary Investigation of Motor Programming in Piano Performance as a Function of Skill Level », dans Don Rogers et John A. Sloboda (dir.), *The Acquisition of Symbolic Skills*, Boston MA, Springer us, p. 283-292.
- *MacKenzie, Christine L., et D. L. Van Eerd (1990), « Rhythmic Precision in the Performance of Piano Scales. Motor Psychophysics and Motor Programming », dans M. Jeannerod (dir.), *Attention and Performance 13. Motor Representation and Control*, Hillsdale, NJ, US, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., p. 375-408, <http://dx.doi.org/10.4324/9780203772010-12>.
- Malcata, Rita M., et Will G. Hopkins (2014), « Variability of Competitive Performance of Elite Athletes. A Systematic Review », *Sports Medicine*, vol. 44, n° 12, p. 1763-1774, <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0239-x>.
- Mendez-Villanueva, Alberto, Iñigo Mujika, et David Bishop (2010), « Variability of Competitive Performance Assessment of Elite Surfboard Riders », *Journal of Strength and Conditioning Research*, vol. 24, n° 1, p. 135-139, <https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e3181a61a3a>.
- Messier, Julie, et John F. Kalaska (1999), « Comparison of Variability of Initial Kinematics and Endpoints of Reaching Movements », *Experimental Brain Research*, vol. 125, n° 2, p. 139-152, <https://doi.org/10.1007/s002210050669>.
- Michaud, Benjamin, Mickaël Begon, et Sonia Duprey (2022), « Bow-side Kinematics Studies in Violinists. An Experimental Design Tracking Intra- and Inter-musician Variability by Bow Stroke, String Played, and Tempo », *Medical Problems of Performing Artists*, vol. 37, n° 3, p. 135-142, <https://doi.org/10.21091/mppa.2022.3020>.
- Moras, Gerard, *et al.* (2018), « Entropy Measures Detect Increased Movement Variability in Resistance Training When Elite Rugby Players Use the Ball », *Journal of Science and Medicine in Sport*, vol. 21, n° 12, p. 1286-1292, <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.05.007>.
- Morgan, Don W., *et al.* (1994), « Daily Variability in Running Economy among Well-trained Male and Female Distance Runners », *Research Quarterly for Exercise and Sport*, vol. 65, n° 1, p. 72-77, <https://doi.org/10.1080/02701367.1994.10762210>.
- Mullineaux, David R., Roger M. Bartlett, et Simon Bennett (2001), « Research Design and Statistics in Biomechanics and Motor Control », *Journal of Sports Sciences*, vol. 19, n° 10, p. 739-760, <https://doi.org/10.1080/026404101317015410>.
- Newell, Karl M. (1986), « Constraints on the Development of Coordination », dans Michael G. Wade et H. T. A. Whiting (dir.), *Motor Development in Children. Aspects of Coordination and Control*, Dordrecht, The Netherlands, Martinus Nijhoff, p. 341-360.
- Newell, Karl M., et Rajiv Ranganathan (2009), « Some Contemporary Issues in Motor Learning », *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 629, p. 395-404, https://doi.org/10.1007/978-0-387-77064-2_20.
- Osborne, Leslie C., Stephen G. Lisberger, et William Bialek (2005), « A Sensory Source for Motor Variation », *Nature*, vol. 437, n° 7057, p. 412-417, <https://doi.org/10.1038/nature03961>.
- *Palmer, Caroline (1996), « Anatomy of a Performance. Sources of Musical Expression », *Music Perception. An Interdisciplinary Journal*, vol. 13, n° 3, p. 433-453, <http://dx.doi.org/10.2307/40286178>.
- *Palmer, Caroline, et Carla van de Sande (1993), « Units of Knowledge in Music Performance », *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, vol. 19, n° 2, p. 457-470, <https://doi.org/10.1037//0278-7393.19.2.457>.

- Paulig, Jakobine, *et al.* (2014), « Sensory Trick Phenomenon Improves Motor Control in Pianists with Dystonia. Prognostic Value of Glove-effect », *Frontiers in Psychology*, vol. 5, article 1012, <https://doi.org/10.3389%2Ffpsyg.2014.01012>.
- *Penel, Amandine, et Carolyn Drake (1998), « Sources of Timing Variations in Music Performance. A Psychological Segmentation Model », *Psychological Research*, vol. 61, n° 1, p. 12-32, <https://doi.org/10.1007/PL00008161>.
- Preatoni, Ezio (2007), *Innovative Methods for the Analysis of Sports Movements and for the Longitudinal Monitoring of Individual Motor Skills*, thèse de doctorat, Politecnico de Milano.
- Preatoni, Ezio, *et al.* (2010), « Motion Analysis in Sports Monitoring Techniques. Assessment Protocols and Application to Racewalking », *Medicina Dello Sport*, vol. 63, n° 3, p. 327-342.
- Preatoni, Ezio, *et al.* (2013), « Movement Variability and Skills Monitoring in Sports », *Sports Biomechanics*, vol. 12, n° 2, p. 69-92, <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.738700>.
- *Repp, Bruno H. (1992), « Diversity and Commonality in Music Performance. An Analysis of Timing Microstructure in Schumann's "Träumerei" », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, n° 5, p. 2546-2568, <https://psycnet.apa.org/doi/10.1121/1.404425>.
- *Repp, Bruno H. (1994), « On Determining the Basic Tempo of an Expressive Music Performance », *Psychology of Music*, vol. 22, n° 2, p. 157-167, <https://doi.org/10.1177/0305735694222005>.
- *Repp, Bruno H. (1995a), « Acoustics, Perception, and Production of *Legato* Articulation on a Digital Piano », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, n° 6, p. 3862-3874, <https://doi.org/10.1121/1.413065>.
- *Repp, Bruno H. (1995b), « Expressive Timing in Schumann's "Träumerei". An Analysis of Performances by Graduate Student Pianists », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 98, n° 5, p. 2413-2427, <https://doi.org/10.1121/1.413276>.
- *Repp, Bruno H. (1996a), « Pedal Timing and Tempo in Expressive Piano Performance. A Preliminary Investigation », *Psychology of Music*, vol. 24, n° 2, p. 199-221, <https://doi.org/10.1177/0305735696242011>.
- *Repp, Bruno H. (1996b), « The Art of Inaccuracy. Why Pianists' Errors Are Difficult to Hear », *Music Perception. An Interdisciplinary Journal*, vol. 14, n° 2, p. 161-183, <https://doi.org/10.2307/40285716>.
- *Repp, Bruno H. (1996c), « The Dynamics of Expressive Piano Performance. Schumann's "Träumerei" Revisited », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100, n° 1, p. 641-650, <https://doi.org/10.1121/1.415889>.
- *Repp, Bruno H. (1997a), « Acoustics, Perception, and Production of *Legato* Articulation on a Computer-controlled Grand Piano », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 102, n° 3, p. 1878-1890, <https://doi.org/10.1121/1.420110>.
- *Repp, Bruno H. (1997b), « Expressive Timing in a Debussy Prelude. A Comparison of Student and Expert Pianists », *Musicae Scientiae*, vol. 1, n° 2, p. 257-268, <https://doi.org/10.1177/102986499700100206>.
- *Repp, Bruno H. (1997c), « Some Observations on Pianists' Timing of Arpeggiated Chords », *Psychology of Music*, vol. 25, n° 2, p. 133-148, <https://doi.org/10.1177/0305735697252004>.
- *Repp, Bruno H. (1997d), « Variability of Timing in Expressive Piano Performance Increases with Interval Duration », *Psychonomic Bulletin & Review*, vol. 4, n° 4, p. 530-534, <https://doi.org/10.3758/bf03214344>.
- *Repp, Bruno H. (1999), « Control of Expressive and Metronomic Timing in Pianists », *Journal of Motor Behavior*, vol. 31, n° 2, p. 145-164, <https://doi.org/10.1080/00222899909600985>.
- Repp, Bruno H., et Rebecca Doggett (2007), « Tapping to a Very Slow Beat. A Comparison of Musicians and Nonmusicians », *Music Perception*, vol. 24, n° 4, p. 367-376, <https://psycnet.apa.org/doi/10.1525/mp.2007.24.4.367>.
- *Salmon, Paul, et Jonathan Newmark (1989), « Clinical Applications of MIDI Technology », *Medical Problems of Performing Artists*, vol. 4, n° 1, p. 25-31.

- Salo, Aki, et Paul N. Grimshaw (1998), « An Examination of Kinematic Variability of Motion Analysis in Sprint Hurdles », *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 14, n° 2, p. 211-222, <https://doi.org/10.1123/jab.14.2.211>.
- Schmidt, Richard A., *et al.* (1979), « Motor-output Variability. A Theory for the Accuracy of Rapid Motor Acts », *Psychological Review*, vol. 86, n° 5, p. 415-451, <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0033-295X.86.5.415>.
- Schmidt, Richard A., et Timothy D. Lee (2011), *Motor Control and Learning. A Behavioral Emphasis*, 5^e éd., Champaign, IL, US, Human Kinetics.
- Schöllhorn, Wolfgang I., et Hans Ulrich Bauer (1998), « Identifying Individual Movement Styles in High Performance Sports by Means of Self-organizing Kohonen Maps », *16 International Symposium on Biomechanics in Sports - Conference Proceedings Archive*.
- *Shaffer, L. H. (1981), « Performances of Chopin, Bach, and Bartok. Studies in Motor Programming », *Cognitive Psychology*, vol. 13, n° 3, p. 326-376, [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(81\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(81)90013-X).
- Shannon, Claude E. (1948), « A Mathematical Theory of Communication », *Bell System Technical Journal*, vol. 27, n° 3, p. 379-423.
- Shmuelof, Lior, John W. Krakauer, et Pietro Mazzoni (2012), « How Is a Motor Skill Learned? Change and Invariance at the Levels of Task Success and Trajectory Control », *Journal of Neurophysiology*, vol. 108, n° 2, p. 578-594, <https://doi.org/10.1152/jn.00856.2011>.
- Slade, Teri (2018), *Measurable Changes in Piano Performance Following a Body Mapping Workshop*, thèse de doctorat, Université d'Ottawa.
- Stergiou, Nicholas (2004), *Innovative Analyses of Human Movement*, Champaign, IL, Human Kinetics.
- Stergiou, Nicholas (2018), *Nonlinear Analysis for Human Movement Variability*, Boca Raton, CRC Press.
- Tominaga, Kenta, *et al.* (2016), « Kinematic Origins of Motor Inconsistency in Expert Pianists », *PLoS ONE*, vol. 11, n° 8, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161324>.
- Tricco, Andrea, *et al.* (2018), « PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR). Checklist and Explanation », *Ann Intern Med.*, vol. 169, n° 7, p. 467-473, <https://doi.org/10.7326/M18-0850>.
- Van Emmerik, Richard E., *et al.* (1999), « Identification of Axial Rigidity during Locomotion in Parkinson Disease », *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 80, n° 2, p. 186-191, [https://doi.org/10.1016/s0003-9993\(99\)90119-3](https://doi.org/10.1016/s0003-9993(99)90119-3).
- *Van Vugt, Floris Tijmen, *et al.* (2013), « The Influence of Chronotype on Making Music. Circadian Fluctuations in Pianists' Fine Motor Skills », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, article 347, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00347>.
- *Van Vugt, Floris Tijmen, *et al.* (2014), « Playing Beautifully When You Have to be Fast. Spatial and Temporal Symmetries of Movement Patterns in Skilled Piano Performance at Different Tempi », *Experimental Brain Research*, vol. 232, n° 11, p. 3555-3567, <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4036-4>.
- *Van Vugt, Floris Tijmen, et Eckart Altenmüller (2019), « On the One Hand or on the Other. Trade-off in Timing Precision in Bimanual Musical Scale Playing », *Advances in Cognitive Psychology*, vol. 15, n° 3, p. 216-225, <https://doi.org/10.5709/facp-0271-5>.
- *Van Vugt, Floris Tijmen, Hans-Christian Jabusch, et Eckart Altenmüller (2012), « Fingers Phrase Music Differently. Trial-to-trial Variability in Piano Scale Playing and Auditory Perception Reveal Motor Chunking », *Frontiers in Psychology*, vol. 3, article 495, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00495>.
- *Van Vugt, Floris Tijmen, Hans-Christian Jabusch, et Eckart Altenmüller (2013), « Individuality That is Unheard of. Systematic Temporal Deviations in Scale Playing Leave an Inaudible Pianistic Fingerprint », *Frontiers in Psychology*, vol. 4, article 134, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00134>.

- *Vaquero, Lucía, Karl Hartmann, *et al.* (2016), « Structural Neuroplasticity in Expert Pianists Depends on the Age of Musical Training Onset », *NeuroImage*, vol. 126, p. 106-119, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.008>.
- Vercueil, A., H. Taljaard, et W. du Plessis (2011), « The Effect of the Tomatis Method on the Psychological Well-being and Piano Performance of Student Pianists. An Exploratory Study », *South African Music Studies*, vol. 31, n° 1, p. 129-158.
- Verdugo, Felipe, *et al.* (2020), « Effects of Trunk Motion, Touch, and Articulation on Upper-limb Velocities and on Joint Contribution to Endpoint Velocities During the Production of Loud Piano Tones », *Frontiers in Psychology*, vol. 11, article 1159, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01159>.
- Verdugo, Felipe, *et al.* (2021), « Proximal-to-distal Sequences of Attack and Release Movements of Expert Pianists during Pressed-Staccato Keystrokes », *Journal of Motor Behavior*, vol. 54, n° 3, p. 316-326.
- *Wagner, Christoph (1971), « The Influence of the Tempo of Playing on the Rhythmic Structure Studied at Pianists Playing Scales », *Medicine and Sport*, vol. 6, Biomechanics II, p. 129-132.
- *Wagner, Christoph, Ernst Piontek, et Ludwig Teckhaus (1973), « Piano Learning and Programed Instruction », *Journal of Research in Music Education*, vol. 21, n° 2, p. 106-122, <https://doi.org/10.2307/3344587>.
- Walker, Cherie, *et al.* (2019), « The Application of Inertial Measurement Units and Functional Principal Component Analysis to Evaluate Movement in the Forward 3½ Pike Somersault Springboard Dive », *Sports Biomechanics*, vol. 18, n° 2, p. 146-162, <https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1574887>.
- Wilson, Frank R. (1992), « Digitizing Digital Dexterity. A Novel Application for MIDI Recordings of Keyboard Performance », *Psychomusicology. A Journal of Research in Music Cognition*, vol. 11, n° 2, p. 79-95, <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/h0094129>.
- *Windsor, W. Luke, et Eric F. Clarke (1997), « Expressive Timing and Dynamics in Real and Artificial Musical Performances. Using an Algorithm as an Analytical Tool », *Music Perception. An Interdisciplinary Journal*, vol. 15, n° 2, p. 127-152, <https://doi.org/10.2307/40285746>.
- Woody, Robert H. (2006), « The Effect of Various Instructional Conditions on Expressive Music Performance », *Journal of Research in Music Education*, vol. 54, n° 1, p. 21-36, <https://doi.org/10.2307/3653453>.