

**LA VARIABILITÉ DE LA PERFORMANCE PIANISTIQUE :
UNE REVUE EXPLORATOIRE**

NICHOLAS SÉGUIN

Thèse soumise à l'Université d'Ottawa
dans le cadre des exigences du programme
Maîtrise ès arts en musique

Laboratoire de recherche en pédagogie du piano
École de musique, Faculté des Arts
Université d'Ottawa

© Nicholas Séguin, Ottawa, Canada, 2021

Résumé

Lorsqu'un mouvement est répété à plusieurs reprises, certaines différences subtiles peuvent être observées entre les répétitions de ce mouvement. Cette variabilité du mouvement et ses implications ont reçu beaucoup d'attention dans le domaine de la biomécanique, mais moins dans le domaine de la performance pianistique. En se basant sur les connaissances acquises dans le domaine de la biomécanique, cette revue exploratoire avait pour but de rassembler les informations recueillies jusqu'à présent quant à la variabilité de la performance pianistique en un seul document afin d'élucider certains enjeux : (i) quels outils techniques et méthodes d'analyse ont été employés afin de mesurer la performance pianistique et sa variabilité ; (ii) quelle est l'influence de l'expertise sur cette variabilité et ; (iii) combien d'essais devraient être employés dans un protocole de recherche afin d'obtenir une évaluation fiable de la performance pianistique. À l'aide des données récoltées, cette revue offre plusieurs recommandations aux chercheurs tenant à prendre en compte l'impact de la variabilité du mouvement et identifie les lacunes dans notre compréhension de la variabilité afin de proposer certaines avenues de recherche futures. Cette thèse démontre l'importance de conduire plus d'enquêtes sur la variabilité de la performance pianistique qui pourront contribuer à notre compréhension du système neuromusculaire et des processus cognitifs qui gouvernent la performance, ainsi qu'à l'implémentation de protocoles de recherche plus robustes.

Mots-clés : performance pianistique, variabilité, expertise, système neuromusculaire, cognition.

Keywords: *piano performance, variability, expertise, neuromuscular system, cognition.*

Remerciements

J'aimerais d'abord remercier mon superviseur de thèse, le professeur Gilles Comeau, pour ses précieux conseils et commentaires tout au long de ma maîtrise et de la rédaction de cette thèse. Ce projet n'aurait pas été possible sans sa rétroaction et son aide.

J'aimerais également remercier les membres du jury, les professeurs Donald Russell et Heidi Sveistrup, pour leurs recommandations et leurs contributions.

Un énorme merci aux amis qui m'ont soutenu durant ce parcours et qui étaient toujours à mes côtés pour me remonter le moral durant les moments plus difficiles.

Enfin, je suis éternellement reconnaissant à ma famille pour leur appui inconditionnel, tant durant les hauts que durant les bas, qui m'encourage à toujours donner le meilleur de moi-même.

Table des matières

Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures	vii
Liste des abréviations.....	viii
Revue de la littérature	1
Définition de la variabilité du mouvement.....	1
La variabilité du mouvement en biomécanique sportive.....	2
La variabilité du mouvement en performance pianistique	3
Justification de la revue exploratoire	5
Cadre de la revue exploratoire	6
La mesure de paramètres prédéterminés	7
Le rôle de l'expertise	9
L'emploi de protocoles avec plusieurs essais.....	10
Objectifs de la revue exploratoire	12
Questions de recherche.....	14
Méthodologie	15
Définition de la revue exploratoire.....	15
Identification des documents pertinents	15
Sélection des documents	16
Organisation des données.....	17
Résultats	19
Résultats de la revue exploratoire	19
Informations pertinentes des documents retenus.....	21
Résumé des résultats	63
Synthèse et discussion	66
Outils de mesure des paramètres	68
La technologie MIDI	69
Systèmes électromécaniques	72
Systèmes acoustiques	73
Analyse du mouvement	73

Méthodes d'analyse de la variabilité	74
Statistiques descriptives	74
Mesures continues	78
Nouvelles approches	82
Lacunes en lien aux méthodes d'analyse de la variabilité	83
Le rôle de l'expertise	87
L'expertise et la variabilité dans l'interprétation de morceaux	87
L'expertise et la variabilité dans l'exécution d'exercices techniques	89
Lacunes concernant le rôle de l'expertise	91
Déterminer le nombre d'essais minimal afin d'obtenir une évaluation stable	92
Le nombre d'essais minimal dans l'interprétation de morceaux	92
Le nombre d'essais minimal dans l'exécution d'exercices techniques	95
Lacunes concernant le nombre d'essais minimal	98
Les défis propres à la performance pianistique	99
La sélection de stimuli	99
L'expression	103
Les facteurs environnementaux	105
Conclusion	107
Liste des références de la revue exploratoire	109
Bibliographie de la thèse	116
Annexe A — Exemple de la procédure de recherche	136
Annexe B — Raisons d'exclusion	137
Annexe C — Organisation des documents	138

Note : l'emploi du genre masculin a pour but d'alléger le texte et d'en faciliter la lecture.

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Informations recueillies des documents retenus	18
Tableau 3.1. Tableau récapitulatif des phénomènes observés lors de l'interprétation de morceaux	64
Tableau 3.2. Tableau récapitulatif des phénomènes observés lors de l'exécution d'exercices techniques	65
Tableau 4.1. Outils techniques utilisés par les études retenues pour cette revue.....	69
Tableau 4.2. Nombre de répétitions employées par les études retenues pour cette revue lors de l'interprétation de morceaux	93
Tableau 4.3. Nombre de répétitions employées par les études retenues pour cette revue lors de l'exécution d'exercices techniques.....	95

Liste des figures

Figure 2.1. Organigramme du processus d'identification de documents.....	17
Figure 3.1. Diagramme démontrant la différence entre la régularité et la stabilité.	20
Figure 4.1. Déviations rythmiques selon la position de la note dans une gamme	79
Figure 4.2. Tempo et stabilité du rythme en fonction de la position sérielle dans une phrase musicale	83
Figure 4.3. (a) Diagramme angle-à-angle du genou et de la hanche pour trois essais (b) Diagramme du coefficient de correspondance de ces trois essais	85
Figure 4.4. Durée, chevauchement et vélocité pour chaque note du thème	88
Figure 4.5. Durée des intervalles entre chaque note d'une gamme de do majeur	90
Figure 4.6. Régularité rythmique quantifiée à l'aide de scores MIOI lors d'une première séance et d'une seconde séance après une durée moyenne d'environ 27 mois	96
Figure 4.7. Comparaison des profils de déviations rythmiques moyens entre deux séances du même pianiste et deux séances de pianistes différents.....	97
Figure 4.8. Profils rythmiques moyens pour les deux répétitions musicales et mécaniques des huit premières mesures de <i>Träumerei</i>	104
Figure 4.9. Instabilité rythmique en fonction de l'heure à laquelle les séances ont eu lieu et du chronotype des pianistes.	106

Liste des abréviations

- CV — coefficient de variation
- IQR — *inter-quartile range* (écart interquartile)
- MAD — *median absolute deviation* (écart absolu moyen)
- CMC — *coefficient of multiple correlation* (coefficient de corrélation multiple)
- ICC — *intra-class correlation coefficient* (coefficient de corrélation intraclasse)
- PCA — *principal component analysis* (analyse en composantes principales)
- NoRMS — *normalised root mean square error* (racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée)
-
- MIDI — *musical instrument digital interface*
- IOI — *inter-onset interval*
- IBI — *inter-bar interval*
- KOT — *key overlap time*
- KDT — *key detached time*

1. Revue de la littérature

1.1. Définition de la variabilité du mouvement

La motricité humaine est un domaine complexe qui fait l'objet d'études depuis plus d'un siècle. Un phénomène particulier de la motricité humaine est la variabilité du mouvement. En effet, 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. L'une des premières théories à ce sujet remonte à Bernstein (1967), où ce dernier propose le problème de la redondance des multiples degrés de liberté du système moteur, soit qu'il existerait une multitude de combinaisons permettant d'exécuter le même mouvement. Il est depuis bien établi que la variabilité est le résultat de plusieurs facteurs. Newell (1986) avance une théorie des contraintes visant à regrouper ces facteurs en trois catégories. Les contraintes individuelles englobent les limites corporelles et sont sous-divisées en deux groupes : structurelles (p. ex. la taille ou le poids) et fonctionnelles (p. ex. la fatigue ou la motivation). Les contraintes environnementales, quant à elles, regroupent les éléments extracorporels (p. ex. la luminosité ou la gravité). Enfin, les contraintes reliées à la tâche sont les limites imposées par l'activité elle-même (p. ex. les propriétés de l'équipement ou les règles de l'activité). Ensemble, ces contraintes gouvernent l'exécution de tout mouvement.

La variabilité 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 (p. ex. avant et après une intervention). Cette perspective a ainsi entraîné des efforts visant à éliminer ou à réduire la présence de cette

variabilité. Toutefois, il est maintenant accepté que la variabilité est inhérente au mouvement et que son étude permet d'en apprendre plus sur le fonctionnement complexe du système neuromusculaire (Glazier & Davids, 2009; Latash et al., 2002). Entre autres, la variabilité pourrait permettre au système nerveux central d'explorer plus facilement les diverses combinaisons offertes par les degrés de liberté du système moteur afin d'exécuter le mouvement désiré (Barbado et al., 2012; Caballero et al., 2017; Davids et al., 2003). En introduisant de subtiles variations entre chaque répétition, la variabilité pourrait aussi avoir pour but de réduire le risque de blessure entraîné par la répétition de mouvements spécialisés (Bartlett et al., 2007; Hamill et al., 1999).

1.2. La variabilité du mouvement en biomécanique sportive

Il va de soi que la variabilité du mouvement vint piquer l'intérêt de chercheurs en biomécanique sportive en raison de ses possibles applications. Preatoni (2013) décrit que, contrairement à la biomécanique clinique qui cherche à dépeindre les comportements moyens, la biomécanique sportive se préoccupe plutôt de l'amélioration des capacités individuelles en termes de performance, de la maîtrise technique, et de la fiabilité des résultats. La littérature semble indiquer que même après plusieurs années d'entraînement, les athlètes élités sont incapables de reproduire parfaitement les mouvements avec lesquels ils possèdent un haut niveau d'expertise (Bartlett et al., 2007; Davids et al., 2003). De surcroît, la variabilité est particulièrement importante dans ce contexte ; ces différences subtiles entre les répétitions d'un même mouvement pourraient être une conséquence de changements environnementaux, des procédures d'entraînement, de pathologies latentes ou de guérisons incomplètes, tout en étant ignorées sous prétexte qu'il ne s'agit que de la variabilité du mouvement (Preatoni et al., 2013). Une meilleure compréhension de la variabilité peut aussi mener à des décisions plus éclairées

lors de l'implémentation de programmes d'entraînement, particulièrement des programmes spécialisés en fonction des modèles de mouvement spécifiques à chaque athlète (Bartlett et al., 2007).

En addition aux préoccupations sportives, la variabilité entraine aussi certaines considérations lorsqu'il en vient à la conduite de la recherche. En outre, la variabilité est un facteur important lors de la sélection de méthode de recherche et l'analyse de données, motivant ainsi plusieurs chercheurs à travailler sur l'établissement de lignes directrices quant au traitement de la variabilité dans le cadre de la recherche (Bartlett et al., 2007; Bates et al., 1992; Chau et al., 2005; Preatoni, La Torre, et al., 2010; Preatoni et al., 2013). Cette préoccupation est d'autant plus importante lorsque l'accent de la recherche passe de mouvements simples, telle la marche, à des séries de mouvements plus complexes qui définissent certains sports (Preatoni et al., 2013). L'étude de la variabilité se voit donc un aspect crucial de la biomécanique sportive puisque cette dernière dicte plusieurs facettes de la recherche dans ce domaine et influence ainsi toutes les décisions qui en découlent.

1.3. La variabilité du mouvement en performance pianistique

La variabilité ne se limite pas aux disciplines sportives ; il est bien établi qu'un pianiste ne performera jamais deux interprétations identiques d'une même pièce, et ce, même à un niveau professionnel après plusieurs heures de répétition (Chaffin et al., 2007; Demos et al., 2016), ou lorsqu'il lui est indiqué de répliquer sa performance précédente (Heinlein, 1929; Keller et al., 2011; Krampe, 1994; MacKenzie et al., 1983). En effet, la performance pianistique est l'une des activités les plus complexes que l'humain puisse accomplir, requérant un contrôle spécifique sur une multitude de systèmes moteurs et perceptuels (Zatorre et al., 2007). Il n'est donc pas surprenant de constater l'impact de la variabilité du mouvement sur la performance pianistique.

Pourtant, l'étude de la variabilité est moins prévalente en performance musicale que dans d'autres domaines. Quelques raisons peuvent être avancées afin d'expliquer ce phénomène. D'abord, le domaine sportif peut faire usage de mesures objectives (p. ex. vitesse, distance) afin de quantifier la performance d'un athlète, tandis que la définition d'une performance musicale est beaucoup plus subjective (Lipke-Perry et al., 2019). Il est possible de mesurer des paramètres objectifs d'une performance musicale (p. ex. 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 est la différence entre la connotation associée à la variabilité dans le domaine des sports, et celle qu'elle possède dans le domaine de la musique. Dans le cadre de plusieurs disciplines sportives, bien que les athlètes élités dédient un montant considérable de leur temps à s'entraîner afin de toujours livrer une performance optimale, la nature motrice et complexe de ces activités fait en sorte qu'il est impossible d'exécuter une performance identique à chaque répétition. Selon Hanin et Hanina (2009), une des plus grandes barricades sur le chemin des athlètes désirant participer aux Jeux olympiques est l'absence de stabilité dans l'exécution de leurs performances sportives. Ainsi, la connotation négative que possède la variabilité encourage la recherche sur ce phénomène et le développement de mesures tel le programme *Identification-Control-Correction*, une approche psychopédagogique qui vise, entre autres, à améliorer la fiabilité des performances d'athlètes professionnels. Chez les musiciens professionnels, la variabilité présente dans la performance peut mener à une impression de « spontanéité » rendant ainsi chaque interprétation unique (Chaffin et al., 2007). De ce fait, la variabilité possède une connotation beaucoup moins négative, voire positive, et il y a donc moins d'intérêt à étudier ce phénomène dans ce contexte.

1.4. Justification de la revue exploratoire

L'étude de la variabilité dans un contexte musical pourrait entraîner plusieurs bénéfices, dont plusieurs qui sont partagés avec le domaine de la biomécanique sportive. D'abord, tout comme dans le domaine des sports, une meilleure compréhension de la variabilité pourrait être utile lors de l'implémentation de programmes de répétition adaptés aux pianistes individuels. Ces connaissances permettraient de déterminer quels aspects de la performance pianistique sont sujets à varier entre chaque répétition et ainsi contribuer à la fiabilité des performances. De même, l'étude de ce phénomène pourrait mener à la prévention de blessures masquées par la variabilité.

Une meilleure compréhension de la variabilité pourrait aussi 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, comme il est possible de retrouver dans les études suivantes : Ajero (2007), Davis (2001), Henley (1999), Slade (2018), Vercueil et al. (2011) et Woody (2006). Également, il n'existe présentement aucune ligne directrice quant aux meilleures pratiques lorsqu'il en vient à l'étude de la performance pianistique (p. ex. quel design expérimental est le plus approprié en fonction du but de l'étude tout en prenant en compte l'impact de la variabilité). La création de telles recommandations pourrait être incroyablement bénéfique aux chercheurs dans le domaine de la musique. Enfin, l'étude de la variabilité de la performance pianistique permettrait de contribuer au développement de la recherche dans plusieurs domaines, tel que le fonctionnement du système neuromusculaire, un sentiment qui fait écho aux propos de Bartlett et collègues (2007):

We require inter-disciplinary studies of skills that require adaptation to environmental or task constraints, or that pose a threat of injury – an organismic constraint – or none of these, to tease out the relative importance of various sources of noise and functionality in movement variability [and we] need to investigate movement and coordination variability while individuals are learning a skill. (p. 240).

Ainsi, il existe présentement un besoin d'étudier la variabilité dans un contexte musical, et plus particulièrement pianistique, ce qui fera l'objet de cette thèse. Un premier pas dans la réalisation de cet objectif est d'effectuer un compte-rendu des informations que nous possédons présentement quant à la variabilité de la performance pianistique, nous permettant ainsi de mieux diriger nos efforts subséquents vers les lacunes qui auront été identifiées. Pour ce faire, cette thèse vise à rassembler les informations pertinentes et à discerner les lacunes quant à notre compréhension de la variabilité de la performance pianistique en effectuant une revue exploratoire (*scoping review*). La décision d'effectuer une revue exploratoire plutôt qu'une revue systématique fut prise en raison de la vaste disparité dans la littérature existante portant sur la variabilité de la performance pianistique. Il fut jugé qu'exclure certaines méthodologies ou populations risquerait de limiter trop considérablement la revue.

1.5. Cadre de la revue exploratoire

Le cadre de cette revue exploratoire se basera sur les avancées faites dans le domaine de la biomécanique sportive quant à la variabilité. Ces avancées peuvent être résumées sous les catégories suivantes : (i) la mesure de paramètres prédéterminés ; (ii) le rôle de l'expertise et ; (iii) l'emploi de protocoles avec plusieurs essais. Ces aspects seront considérés afin de guider la recherche et l'évaluation de documents.

1.5.1. La mesure de paramètres prédéterminés

La variabilité de la performance 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 la nature motrice de l'activité 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 (p. ex. le mouvement du bras lors d'un lancer de javelot), tandis que les paramètres globaux font référence à la variabilité du résultat achevé (p. ex. 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 et al., 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 variabilité de paramètres techniques est une meilleure mesure de la différence entre les groupes que la variabilité de paramètres globaux.

Plusieurs méthodes ont été mises de l'avant afin d'analyser la variabilité de ces paramètres. D'abord, certaines statistiques descriptives sont typiquement utilisées dans ce genre d'analyse : l'écart type et le coefficient de variation. Ces dernières permettent entre autres d'évaluer la dispersion des données autour de la moyenne. À titre d'exemple, dans une étude portant sur le lancer de baseball, Fleisig et collègues (2009) ont examinés cinq lancers effectués par des participants de différents niveaux d'expertise. L'écart type de divers paramètres préétablis (p. ex. l'angle de flexion du genou) a été calculé pour les cinq lancers de chaque

participant. Ces écarts types ont par la suite pu faire l'objet d'une analyse de variance afin de déterminer si une différence significative était présente entre les différents groupes. L'utilisation de l'écart type et du coefficient de variation est cependant parfois critiquée puisque ces variables présument que les données sont distribuées normalement. Certains chercheurs ont donc proposé d'utiliser l'écart interquartile (*inter-quartile range*, IQR) ou l'écart absolu moyen (*median absolute deviation*, MAD) (Chau et al., 2005; Preatoni et al., 2013). Additionnellement, il est recommandé de mesurer le paramètre à plusieurs reprises et d'éliminer toute occurrence atypique (Chau et al., 2005).

Un enjeu particulier lorsqu'il en vient à l'analyse de paramètres techniques est que l'emploi de variables discrètes ne révèle potentiellement pas toutes les informations pertinentes quant au mouvement exécuté (Queen et al., 2006). Quelques études ont donc exploré la possibilité d'utiliser le coefficient de corrélation multiple (*coefficient of multiple correlation*, CMC) (Kadaba et al., 1989) et le coefficient de corrélation intraclasse (*intra-class correlation coefficient*, ICC) (Ferber et al., 2002) afin d'évaluer la répétabilité de variables continues au cours de plusieurs essais. Ces dernières mesures sont rapportées en tant que valeurs allant de 0 (répétabilité très faible) à 1 (répétabilité parfaite). Plus récemment, certaines méthodes plus complexes, telles les mesures d'entropie et l'analyse en composantes principales (*Principal Component Analysis*, PCA), ont aussi été considérées dans l'étude de la variabilité de mouvements sportifs, mais nécessitent davantage de recherches (Preatoni et al., 2013). En somme, il existe plusieurs méthodes permettant l'évaluation de la variabilité de la performance, et la méthode adéquate dépend du paramètre évalué ainsi que des objectifs du chercheur (Preatoni et al., 2013).

1.5.2. Le rôle de l'expertise

Un facteur à considérer dans toute étude portant sur la variabilité est le niveau d'expertise du participant. Les habiletés motrices représentent la capacité à produire un résultat prédéterminé avec un fort degré de certitude (Newell & Ranganathan, 2009; Schmidt & Lee, 2011). Par conséquent, l'apprentissage d'habiletés motrices, dont l'exécution de mouvements sportifs, se traduit par une capacité à produire, à répétition, une performance fiable (Preatoni et al., 2013). Pour ces raisons, la variabilité a historiquement été utilisée en tant que déterminant du niveau d'expertise (Caballero et al., 2017; Churchland et al., 2006; Harris & Wolpert, 1998; Osborne et al., 2005; Schmidt et al., 1979; Shmuelof et al., 2012). On remarque par exemple plus de variabilité 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 variabilité réduite, tandis que les novices sont toujours à la recherche de la séquence motrice la plus appropriée (Glazier & 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 & Bauer, 1998).

Cette différence de variabilité en fonction de l'expertise souligne le besoin de conduire ces études sur plusieurs populations, un phénomène qui peut être observé dans le domaine de la course à pied. À titre d'exemple, plusieurs paramètres tels la consommation d'oxygène et le rythme cardiaque ont été étudiés chez différentes populations allant de l'athlète élite (Conley & Krahenbuhl, 1980) aux enfants âgés de 7 à 9 ans (Rogers et al., 1994). Bref, il n'est pas possible

de généraliser les résultats concernant la variabilité d'un paramètre sur plusieurs populations possédant divers niveaux d'expertise.

1.5.3. L'emploi de protocoles avec plusieurs essais

Lorsqu'il en vient à l'étude d'habiletés motrices, il est recommandé de mesurer la performance du sujet à plusieurs reprises (Chau et al., 2005), puisque l'analyse d'un seul essai pourrait mener à des conclusions erronées (Bates et al., 1992). Cependant, il n'existe pas de guide 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 afin de remédier à ce problème est la procédure d'estimation séquentielle (*sequential estimation procedure*) telle qu'employée par Hamill et McNiven (1990). Dans cette étude portant sur divers paramètres des forces de réaction du sol (*ground reaction force*), les participants ont complété vingt essais, permettant ainsi d'établir une moyenne de chaque paramètre pour la totalité de ces essais. Une moyenne cumulative a par la suite été calculée pour chaque participant et chaque paramètre, en commençant par le premier essai et en ajoutant un essai à la fois, ajustant la moyenne à chaque ajout. Lorsque cette nouvelle moyenne cumulative tombe et demeure dans un intervalle prédéterminé (dans ce cas-ci, $\pm 0,25$ écart type de la moyenne des 20 essais), elle est déclarée stable et le nombre d'essais minimal pour ce participant et ce paramètre peut être établi. Enfin, une moyenne de ces nombres d'essais minimaux est calculée, ce qui détermine ainsi le nombre approprié d'essais à effectuer pour obtenir une évaluation fiable. Les analyses subséquentes, de ce fait, devront à leur tour utiliser ce nombre d'essais minimal. Il est à noter que l'intervalle de $\pm 0,25$ écart type choisi ici est, selon les auteurs, un choix conservateur, et de ce fait ne reflète pas nécessairement un standard accepté de tous.

Des études semblables ont été conduites, particulièrement dans le domaine de la course à pied, dans le but de déterminer si un seul essai était nécessaire afin d'obtenir une évaluation fiable de certains paramètres. Morgan et collègues (1991), par exemple, ont observé la variabilité de divers paramètres de la course à pied chez des coureurs lors de deux évaluations conduites sur deux journées consécutives. Les données révèlent que l'ICC de certains paramètres entre les deux évaluations était assez élevée pour conclure qu'un seul essai était nécessaire afin d'obtenir une évaluation fiable. Encore une fois, il est important de noter qu'il n'existe pas de guide quant à la valeur ICC minimale afin de déterminer qu'une variable est fiable ; Shrout (1998) propose qu'une valeur supérieure à 0,80 peut être considérée comme « substantielle » quant à la fiabilité, mais certains rétorqueront que la valeur minimale pourrait dépendre de la variable, de l'objectif de recherche, et de la population à l'étude (Atkinson & Nevill, 1998; Duhamel et al., 2004; Preatoni et al., 2013).

Un autre élément critique de l'étude de la fiabilité d'une variable est la nécessité de minimiser l'influence des facteurs environnementaux. Dans la même étude de Morgan et collègues (1991), il est souligné que les participants devaient porter les mêmes souliers lors des évaluations, et que ces dernières devaient prendre place au même moment de la journée et sur le même tapis roulant. De plus, les participants ont eu l'opportunité de s'accommoder au tapis roulant pendant quelques dizaines de minutes avant de débiter l'évaluation, minimisant ainsi l'influence des contraintes tels la fatigue et le manque de familiarité avec l'instrument de mesure (dans ce cas-ci, le tapis roulant). En procédant ainsi, les différences observées entre les essais peuvent être attribuées à la variabilité de la performance du participant, et non à d'autres facteurs. Enfin, la différence de variabilité en fonction de l'expertise fait en sorte que le nombre

d'essais minimal pour obtenir une évaluation fiable d'un paramètre pourrait changer en fonction de la population à l'étude (Atkinson & Nevill, 1998; Duhamel et al., 2004; Preatoni et al., 2013).

1.6. Objectifs de la revue exploratoire

La variabilité est un phénomène qui, par son existence, entraîne plusieurs préoccupations méthodologiques. Puisque les mouvements sont sujet à varier de répétition en répétition, une proportion de la différence observée entre la performance de plusieurs individus, ou diverses performances du même individu, est entraînée par la variabilité (Bartlett et al., 2007; Morgan et al., 1991). Un tel souci est particulièrement important dans le cadre de domaines où les habiletés motrices sont de mise, telle la performance sportive; certaines différences subtiles présentes dans le mouvement, ou de légers changements à chaque répétition provoqués par des changements environnementaux, une pathologie latente ou une guérison incomplète peuvent être masqués par la variabilité (Preatoni et al., 2013). Cette problématique est exacerbée par la nature experte de ces activités, faisant en sorte que les études dans ces domaines sont occasionnellement conduites sur un petit échantillon (p. ex. Conley & Krahenbuhl (1980), Morriss (1997), Robins et al. (2006) et Wheat et al. (2005)). Il y a donc un grand intérêt à mettre en place des ressources et des bases de données auxquelles les chercheurs peuvent se référer afin de prendre en compte l'impact de la variabilité sur leurs résultats.

Plusieurs avancées ont été accomplies dans le domaine de la biomécanique sportive quant à ces préoccupations. D'abord, il est important d'évaluer la performance en fonction de certains paramètres identifiés *a priori*. La variabilité de ces paramètres est ensuite typiquement déterminée à l'aide de variables discrètes (Chau et al., 2005; Preatoni et al., 2013), cependant certains chercheurs ont proposé d'utiliser des mesures continues afin de mieux représenter la nature du mouvement humain (Ferber et al., 2002; Kadaba et al., 1989). Il est recommandé

d'employer des protocoles avec plusieurs essais afin de s'assurer que les données récoltées soient fiables (Bates et al., 1992; Chau et al., 2005). Bien qu'il n'existe pas de standard à suivre quant au nombre d'essais approprié, quelques méthodes comme l'estimation séquentielle ont été mises de l'avant afin de répondre à cet enjeu (Hamill & McNiven, 1990). De plus, le nombre d'essai minimal pourrait varier en fonction de l'objectif de recherche et la population à l'étude (Atkinson & Nevill, 1998; Duhamel et al., 2004; Preatoni et al., 2013). Enfin, l'expertise est un facteur à prendre en compte lors de l'analyse de la variabilité de la performance, puisqu'elle pourrait jouer un rôle dans la variabilité observée et le nombre d'essais approprié (Arutyunyan et al., 1968; Chapman et al., 2009; Glazier & Davids, 2009; Schöllhorn & Bauer, 1998).

La performance pianistique est une activité qui est affectée par la variabilité du mouvement (Chaffin et al., 2007; Demos et al., 2016; Van Vugt et al., 2012). Tout comme la biomécanique sportive, le domaine de la performance pianistique peut bénéficier d'une meilleure compréhension de la variabilité. En effet, l'étude de ce phénomène dans un contexte pianistique pourrait mener à l'implémentation de programmes spécialisés, à la prévention de blessures et au développement de méthodologies plus robustes. Il est d'abord nécessaire d'évaluer l'amplitude des informations que nous possédons déjà sur la variabilité de la performance pianistique et de rassembler ces données en une seule ressource qui pourra servir de référence. De plus, il est nécessaire d'adresser les défis qui pourraient se présenter lors de l'étude de la variabilité dans un contexte musical, par exemple, le rôle de la composante expressive sur les interprétations d'un pianiste. De surcroît, il est important de déterminer comment traduire l'étude de la variabilité dans un contexte plus général au contexte spécialisé de la performance pianistique.

1.6.1. Questions de recherche

À partir du cadre établi précédemment, certaines questions de recherche ont été élaborées afin de guider le processus d'identification de documents et de déterminer certaines informations qui pourront être utiles dans des recherches subséquentes. Après avoir déterminé quels paramètres de la performance pianistique ont été identifiés et étudiés dans la littérature existante, la revue cherchera à répondre aux questions suivantes :

1. Quels outils techniques ont été utilisés afin d'évaluer ces paramètres?
2. Quelles méthodes d'analyse ont été employées afin de mesurer la variabilité de ces paramètres?
3. Que pouvons-nous conclure quant au rôle de l'expertise sur la variabilité de ces paramètres?
4. 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?

Et plus généralement :

5. Quelles sont les lacunes majeures quant à notre compréhension de la variabilité de la performance pianistique?
6. Existe-t-il des défis spécifiques à la performance pianistique lorsqu'il en vient à l'étude de la variabilité?

Rassembler ces informations dans un seul document permettra de fournir une ressource aux chercheurs tenant à prendre en compte la variabilité lors du développement de méthodologies et l'analyse de résultats, ainsi que des informations sur les défis spécifiques que pose l'étude de la variabilité dans le domaine de la performance pianistique. Cette revue permettra aussi de fournir des recommandations quant aux avenues de recherche à explorer dans l'avenir.

2. Méthodologie

2.1. Définition de la revue exploratoire

Cette revue exploratoire suit le modèle décrit par Arksey et O'Malley (2005) qui comporte les étapes suivantes :

- (i) Identification des questions de recherche
- (ii) Identification des documents pertinents
- (iii) Sélection des documents
- (iv) Organisation des données
- (v) Synthèse et présentation des résultats

La première étape, l'identification des questions de recherche, peut être retrouvée dans la section précédente. Les étapes subséquentes sont présentées ci-dessous. En addition à ce cadre méthodologique, le présent document suit aussi les recommandations PRISMA-ScR (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews*) (Tricco et al., 2018) afin d'effectuer une revue complète et détaillée.

En comparaison aux revues systématiques, les revues exploratoires ont habituellement une étendue plus large, mais moins profonde, prenant en considération un plus grand nombre de documents. De plus, les revues exploratoires ne jugent pas nécessairement de la qualité des documents sélectionnés et utilisent une approche narrative plutôt que d'effectuer une synthèse et une agrégation des données quantitatives (Arksey & O'Malley, 2005).

2.2. Identification des documents pertinents

Aucun critère d'exclusion *a priori* n'a été employé. Les bases de données suivantes ont été consultées afin d'identifier des documents : PsycINFO, ProQuest Dissertations & Theses, JSTOR, uOttawa Library Catalogue (voir l'**Annexe A** pour un exemple de la procédure de

recherche). Les bibliographies de certains articles pertinents ont de même été consultées.

Certains documents ont été recommandés par des pairs.

2.3. Sélection des documents

Un total de 104 documents a été identifié à partir des sources d'informations mentionnées, dont 47 qui ont été retenus pour la revue exploratoire (**Figure 2.1**). Les articles rejetés avaient, la majorité du temps, un titre ou un résumé prometteur, mais, après une revue plus approfondie, ne contenaient pas d'information pertinente. Les documents ont été évalués afin de trouver des informations pertinentes quant aux sujets suivants :

- La variabilité d'un ou plusieurs paramètres de la performance pianistique;
- L'influence de l'expertise sur la variabilité d'un ou de plusieurs paramètres de la performance pianistique;
- L'influence de la durée séparant les interprétations sur la variabilité d'un ou de plusieurs paramètres de la performance pianistique.

Dans plusieurs cas, le but principal du document n'était pas d'évaluer l'un de ces critères, mais il contenait néanmoins des informations pertinentes en lien à la variabilité. Un exemple d'un tel cas serait un article où, dans le cadre de la procédure expérimentale, le participant devait compléter plusieurs interprétations d'un même stimulus, et le document rapporte des informations quant à la similarité entre les interprétations.

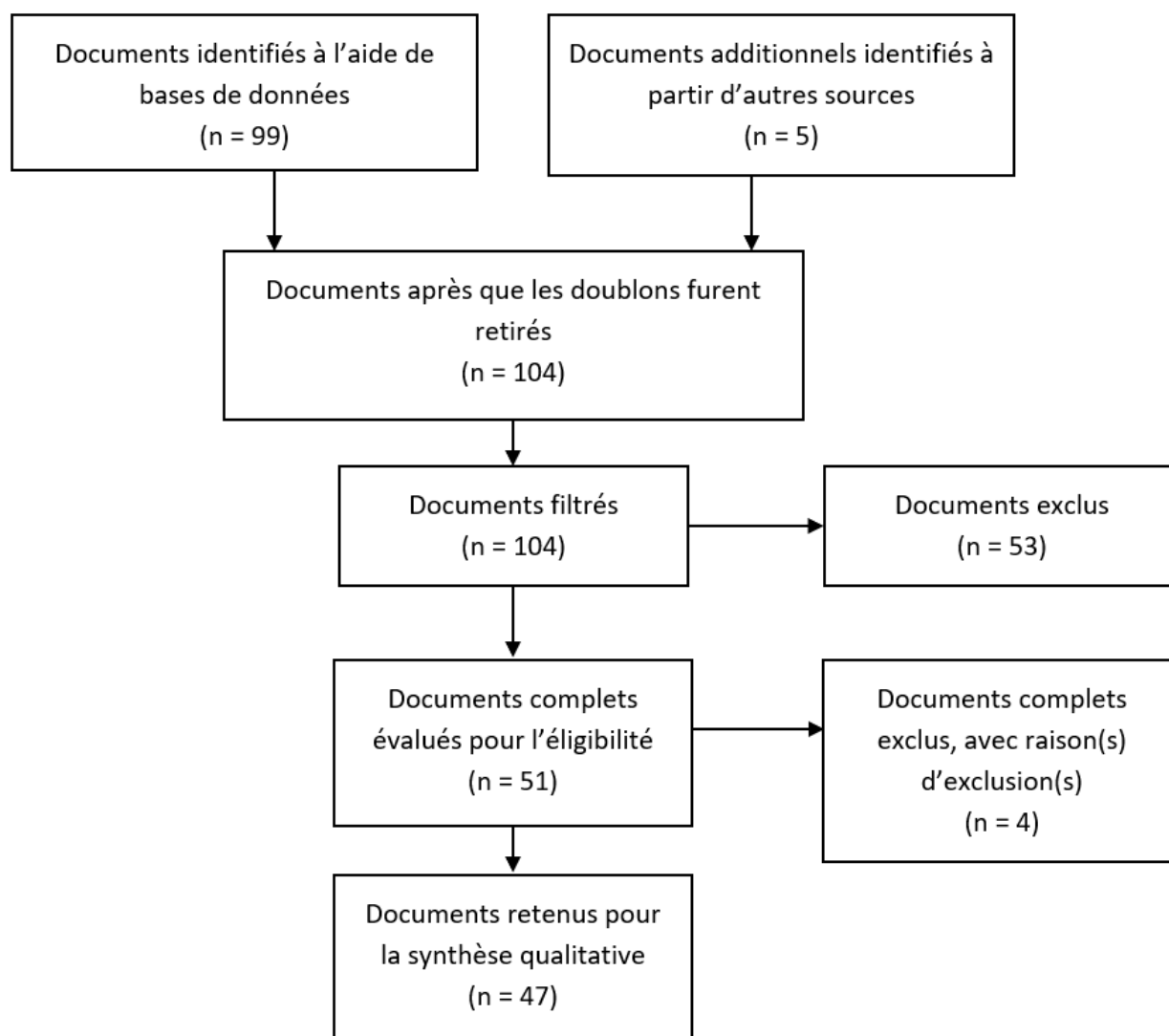


Fig. 2.1 Organigramme du processus d'identification de documents. Les documents identifiés à partir d'autres sources ont été recommandés par des pairs. La liste de documents complets exclus avec raisons d'exclusions peut être retrouvée en **Annexe B**. La liste de documents retenus pour la synthèse qualitative peut être retrouvée dans la liste de références à cet effet.

2.4. Organisation des données

Conformément au cadre méthodologique d'Arksey et O'Malley (2005), une approche plutôt descriptive-analytique a été adoptée afin d'organiser et de rapporter l'information collectée. Pour chaque document, certaines informations ont été recueillies le cas échéant (**Tableau 2.1.**).

Tableau 2.1. Informations recueillies des documents retenus

Informations générales	• Titre • Auteur(s) • Date de publication
Informations quant à la méthodologie	• Participants • Type de stimulus employé ○ 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
Résultats pertinents	• Concernant un ou plusieurs paramètre(s) identifié <i>a priori</i> : ○ La présence d'erreurs ○ L'intensité (<i>dynamics</i>) ○ L'articulation ○ L'utilisation de la pédale ○ Le rythme • Concernant le rôle de l'expertise sur la variabilité • Concernant le nombre de répétitions nécessaire afin d'obtenir une évaluation stable

Les documents ont par la suite été organisés en fonction du type de stimulus employé et les résultats importants rapportés (**Annexe C**), et les données recueillies ont été utilisées afin de créer une synthèse narrative.

3. Résultats

3.1. Résultats de la revue exploratoire

Cette section présente les informations pertinentes de chaque document retenu afin de répondre aux questions posées par cette revue exploratoire. Un résumé de ces informations peut être retrouvé dans la section 3.2. La liste de documents retenus pour la revue exploratoire peut être retrouvée dans la liste de références à cet effet.

La terminologie liée à la variabilité dans les documents sélectionnés tend à varier considérablement et, à l'occasion, un terme est utilisé pour référer à des phénomènes différents, ou plusieurs termes font référence au même phénomène. De plus, puisque les documents retenus sont rédigés en anglais, plusieurs traductions vers le français sont possibles pour ces termes. Par conséquent, ce document tente autant que possible d'utiliser une terminologie standardisée pour l'entièreté de la revue. En outre, la régularité/l'irrégularité fait référence à la variabilité d'un paramètre à l'intérieur d'un stimulus. Par exemple, à quel point l'intensité varie de note en note lors de l'interprétation d'un morceau, ou à quel point le rythme est constant lors de l'exécution d'une gamme. La stabilité, quant à elle, peut être définie comme étant la variabilité entre plusieurs répétitions d'un même stimulus. Ce stimulus peut s'agir d'un thème qui revient à plusieurs reprises dans un morceau, ou plusieurs performances d'un même morceau (**Figure 3.1**). Ces définitions sont semblables à celles établies par Van Vugt et collègues (2012). Le terme « variabilité » fait référence tant à la régularité qu'à la stabilité.

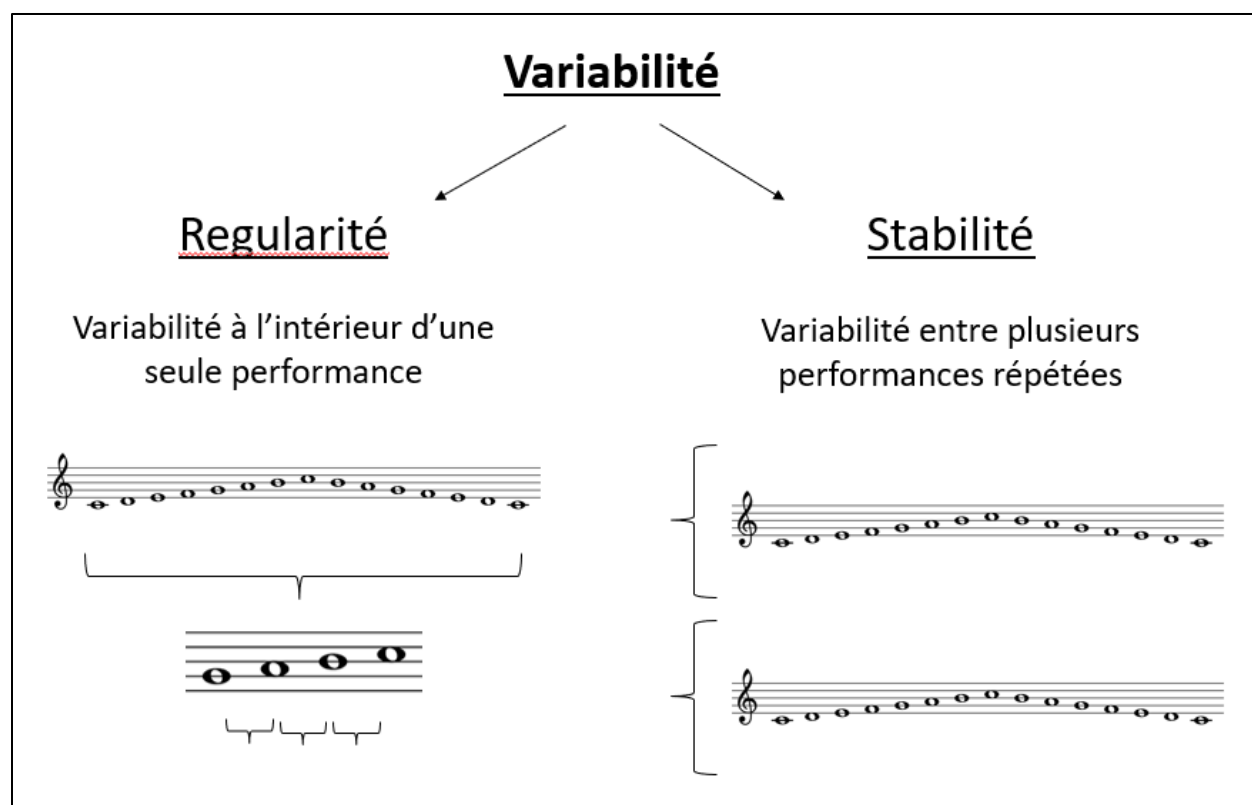


Figure 3.1. Diagramme démontrant la différence entre la régularité et la stabilité.

3.1.1. Informations pertinentes des documents retenus

Titre		Practicing perfection: How concert soloists prepare for performance	
Auteur(s)		Chaffin, R. et Logan, T.	Date
			2006
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste avancée	J.S. Bach <i>Italian Concerto</i> (Presto)	8	Quelques jours; jouées à l'intérieur de 2 semaines
Résultats pertinents			

Les auteurs avancent l'hypothèse que certaines différences systématiques entre les performances reflètent des choix conscients de l'interprète afin de donner l'impression que leur performance est spontanée. Les différences non systématiques, quant à elles, sont une conséquence du « bruit » du système moteur, c.-à-d. la variabilité.

Pour tester cette hypothèse, deux performances ont été comparées; l'une d'entre elles était une performance donnée à des fins d'enregistrement, et l'autre une moyenne de sept répétitions bien préparées jouées dans les deux semaines précédant la performance finale. Bien que les tempi des deux interprétations étaient différents — ce que l'interprète avait anticipé, admettant qu'elle comptait jouer plus lentement pour la performance enregistrée — les auteurs remarquent plusieurs similarités entre les profils rythmiques ($r = 0,79$). Les différences observées ont pu être attribuées à certaines variables identifiées par les auteurs (p. ex. le début des phrases, le saut d'une octave dans le morceau, un changement dans l'intention expressive), ce qui suggère que même sur des performances motrices hautement automatisées, les pianistes conservent un contrôle conscient sur certains aspects de leurs interprétations, ce qui peut expliquer une proportion des différences trouvées entre plusieurs interprétations.

Titre		Spontaneity and creativity in highly practised performance	
Auteur(s)		Chaffin, R., Lemieux, A. et Chen, C.	Date
			2006
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste avancée	J.S. Bach <i>Italian Concerto</i> (Presto)	7	Jouées à l'intérieur d'une semaine
Résultats pertinents			

Ce chapitre compare plusieurs performances d'une pianiste avancée jouées à l'intérieur d'une semaine*. Ces performances étaient à des fins d'enregistrement et bien préparées; les six premières afin de réaliser un enregistrement vidéo, et la dernière une performance pour un CD.

Les auteurs remarquent certaines différences significatives au niveau du rythme entre les performances. Ces différences étaient situées à des endroits spécifiques du morceau (p. ex. passages difficiles, fins de phrases) identifiés par les auteurs, suggérant que ces différences ne sont pas une simple conséquence de la variabilité, mais bien des décisions conscientes de l'interprète à des fins expressives. De plus, ces résultats soulèvent l'hypothèse que le contexte de la performance puisse avoir un impact, conscient ou inconscient, sur la performance de l'interprète.

**Cette étude partage les mêmes données que Chaffin et Logan (2006)*

Titre	"It is different each time I play": Variability in highly prepared musical performance		
Auteur(s)	Chaffin, R., Lemieux, A. et Chen., C.	Date	2007
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste avancée	J.S. Bach <i>Italian Concerto</i> (<i>Presto</i>)	7	6 en une journée
Résultats pertinents			

Les auteurs avancent l'hypothèse que les interprètes effectuent un compromis entre la flexibilité de certains passages et une stabilité plus accrue dans d'autres passages. L'identification et l'étude de gestes musicaux (p. ex. une modulation, un changement de section) ont permis de tester cette hypothèse sur 7 répétitions d'un même morceau*. Ces performances étaient bien préparées, et selon l'interprète, étaient similaires et près de sa performance idéale.

L'analyse révèle d'abord un coefficient de corrélation supérieur à $r = 0,90$ entre les performances quant au rythme, à l'intensité, et à la régularité de l'intensité, démontrant ainsi un haut niveau de similarité. Certaines différences significatives présentes dans les gestes musicaux ont pu être observées entre les performances, suggérant que ces différences sont une partie intégrante de la performance pianistique. Les performances individuelles différaient assez de la performance moyenne afin de conclure que ces différences ne pouvaient pas être causées que par la variabilité de la performance, mais aussi par des répercussions des processus psychologiques impliqués dans l'interprétation musicale. De plus, l'analyse révèle que la variabilité est moindre lors des passages qui agissent en tant que sources de stabilité, confirmant ainsi l'hypothèse que la variabilité est restreinte lors des passages stables, mais permise lors des gestes musicaux. Certaines différences entre les performances sont donc systématiques. Cependant, les auteurs concluent que ces différences ne sont pas pour autant toujours délibérées.

*Cette étude partage les mêmes données que Chaffin et Logan (2006)

Titre	Memory and Performance		
Auteur(s)	Chaffin, R. et Imreh, G.	Date	2005
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste avancée	J.S. Bach <i>Italian Concerto</i> (<i>Presto</i>)	4	Non spécifié
Résultats pertinents			

D'abord, ce chapitre confirme que même les pianistes avancés commettent des erreurs lors de l'interprétation de morceaux préparés.

L'étude de 4 interprétations*, 3 à des fins de répétition et la dernière une performance enregistrée, révèle une différence entre la durée moyenne de chaque mesure (et donc du rythme) entre les interprétations. Les auteurs remarquent en premier lieu que le début des différentes sections du morceau est joué plus rapidement, suggérant une altération du rythme à des fins expressives. En second lieu, les auteurs concluent que certaines hésitations présentent dans les performances peuvent être attribués au rappel de « *performance cues* », c'est-à-dire, des indications présentes dans la partition dictant l'interprétation (p. ex. *subito forte*, *leggero*). Ainsi, certaines différences entre les performances peuvent être entraînées par le processus de rappel d'éléments liés à l'interprétation.

*Cette étude partage les mêmes données que Chaffin et Logan (2006)

Titre	Altered Sensory Feedbacks in Pianist's Dystonia: the altered auditory feedback paradigm and the glove effect		
Auteur(s)	Cheng, F., Grossbach, M. et Altenmüller, E.	Date	2013
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
25 pianistes avancés	Gamme de do majeur	Minimum 20 gammes	Aucune

Résultats pertinents

Cet article étudiant l'impact de la rétroaction auditive altérée sur la dystonie focale chez les musiciens fait l'emploi d'une méthode intitulée « *scale analysis* » (analyse de gamme) qui utilise la variabilité à des fins d'évaluation. Pour ce faire, les IOIs (*inter-onset interval*, la durée entre l'appui de deux notes) d'au moins 20 gammes complétées ont été extraits, à l'exception du dernier IOI de chaque gamme, puisque ce dernier était fréquemment allongé selon les intentions expressives de l'interprète. La variabilité de ces IOIs est ensuite calculée à l'aide du coefficient de variation, une mesure qui définit l'irrégularité des IOIs durant la performance. Ces coefficients de variations ont été calculés séparément pour les gammes ascendantes et descendantes puisqu'il s'agit de deux patrons moteurs (*motor patterns*) différents.

Les valeurs exactes pour la condition contrôle ne sont pas rapportées dans cet article. Cependant, la variabilité était plus importante chez les participants atteints de dystonie focale.

Titre	Some Aspects of Rhythm and Expression in Performances of Erik Satie's "Gnossienne No. 5"		
Auteur(s)	Clarke, E.	Date	1985
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste avancé	Satie <i>Gnossienne no. 5</i>	3	Environ 30 minutes
Résultats pertinents			

Dans cet article, Clarke étudie le rythme dans trois performances de *Gnossienne no. 5* données par un pianiste avancé et séparées par une trentaine de minutes.

Une conclusion principale qui peut être tirée de cette étude est que les trois performances sont extrêmement similaires. Dans leur durée entière (en secondes), les trois performances diffèrent par moins de 2 %. Ce phénomène est le résultat de minuscules différences dans le rythme tout au long des interprétations qui, lorsqu'accumulées, entraînent cette minime différence. Cette similarité dans les performances est même retrouvée dans les passages où le rythme de l'interprète déviait de ce qui était indiqué de la partition. L'écart type des IOIs extraits des performances surpasse rarement 0,01, suggérant un contrôle très précis du rythme — les quelques exceptions peuvent être retrouvées dans les sections avec une transition entre deux rythmes complexes. Pour l'une de ces exceptions, l'interprète avance avoir parfois mis l'accent sur le début de la phrase, et à d'autres occasions, sur la fin de la phrase, expliquant ainsi l'écart type plus large. Il est aussi possible d'en conclure que certaines différences peuvent être expliquées par des décisions expressives de l'interprète.

Titre		Timing in the performance of Erik Satie's 'Vexations'	
Auteur(s)		Clarke, E.	Date
			1982
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
2 pianistes aux études supérieures	Satie <i>Vexations</i>	72	1 seule séance d'environ 1 heure

Résultats pertinents

Dans cet article, Clarke étudie le rythme de 72 performances de *Vexations* chez deux pianistes. Les interprètes furent invités à varier leur tempo d'interprétation en interprétation, mais à conserver le même rythme à l'intérieur de chaque performance. Les enregistrements ont par la suite été regroupés en six groupes de douze performances, en fonction du tempo de l'interprétation. Chaque groupe contient donc six performances similaires en matière de rythme.

Malgré l'indication de conserver un rythme constant tout au long de l'interprétation, plusieurs déviations peuvent être observées. Clarke avance que ces déviations sont le résultat de choix expressifs des interprètes et non de difficultés motrices. D'abord, le stimulus en question était facile à interpréter considérant le niveau d'expertise des pianistes. De plus, les déviations observées sont constantes au travers des six différents groupes, suggérant qu'il s'agit de décisions conscientes. Clarke remarque aussi que les déviations sont moins prononcées plus le rythme est rapide — les irrégularités rythmiques ne sont donc pas causées par un manque de contrôle, mais bien à des fins expressives.

Un autre résultat présenté par Clarke est l'augmentation du coefficient de variation plus le tempo est rapide (du tempo 1 au tempo 6 : de 0,087 à 0,099 pour le premier participant, et de 0,079 à 0,083 pour le second participant). Il est donc possible que la variabilité augmente plus le tempo est rapide. Cependant, ce résultat ne fut pas significatif sur un test Mann-Whitney.

Titre			
Flexibility of Expressive Timing in Repeated Musical Performances			
Auteur(s)			Date
Demos, A., Lisboa, T. et Chaffin, R.			2016
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 violoncelliste avancée	J.S. Bach <i>Suite no. 6 pour violoncelle (Prélude)</i>	12	Jouées à l'intérieur de 3 mois et demi
1 pianiste avancée	J.S. Bach <i>Italian Concerto (Presto)</i>	8	Jouées à l'intérieur de 10 jours
Résultats pertinents			

Le but de cet article était d'observer la stabilité du rythme, plus précisément le contrôle du rythme en fonction de la position dans une phrase musicale, à travers multiples performances données par deux musiciennes avancées. La stabilité du rythme fut examinée en comparant le rythme de chaque mesure ou demi-mesure entre les interprétations.

Un des résultats principaux de cet article est que lorsque plusieurs performances sont comparées, le rythme est plus stable au milieu des phrases musicales, contrairement aux débuts et aux fins de phrases où la stabilité est moins importante. Par conséquent, la stabilité du rythme est directement reliée à la structure du morceau.

Les auteurs rapportent aussi une relation complexe entre la stabilité et la répétition (*practice*). Pour les mesures qui ont été peu ou très répétées, la stabilité diminua avec la répétition. Quant aux mesures ayant reçu un montant intermédiaire de répétition, ainsi que les quelques mesures qui ont été répétées le plus souvent, la stabilité augmenta avec l'entraînement. Puisque la répétition n'a pas été contrôlée durant l'étude, il n'est pas possible de former des conclusions définitives quant à ce phénomène. Cependant, la similarité de cet effet chez les deux interprètes incite une recherche plus poussée à ce sujet.

Titre	Skill acquisition in music performance: relations between planning and temporal control		
Auteur(s)	Drake, C. et Palmer, C.	Date	2000
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations

60 pianistes (48 enfants de 7-16 ans, 12 adultes de 20-30 ans) de divers niveaux d'expertise	Stimuli conçus pour l'expérience	11	Aucune
--	----------------------------------	----	--------

Résultats pertinents

Cette étude portait sur l'acquisition d'habiletés musicales chez des pianistes de divers âges et niveaux d'expertise. Une de trois tâches de lecture à vue, selon le niveau d'expertise du sujet, fut présentée aux participants. Ces derniers jouèrent ensuite le même morceau à dix reprises.

Plusieurs conclusions soulignées par les auteurs sont d'intérêt. D'abord, les novices font plus d'erreurs et commettent différents types d'erreurs que les experts. En effet, les erreurs commises par les novices étaient en grande proportion des erreurs de rythme et, moins fréquemment, des erreurs de hauteur, alors que l'inverse était vrai chez les experts. De plus, la performance des novices était très variable, partiellement en raison des maintes erreurs de rythme (p. ex. des hésitations, des pauses, des corrections), ce qui rendit l'évaluation de nuances expressives difficiles. Bien qu'il s'agisse ici de performances non préparées, ces résultats suggèrent que la variabilité devrait être approchée différemment chez des pianistes de divers niveaux d'expertise.

Titre	Accent Structures in Music Performance		
Auteur(s)	Drake, C. et Palmer, C.	Date	1993
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
10 pianistes avancés	Stimuli conçus pour l'expérience	3	Aucune

Résultats pertinents

Dans cet article, il fut demandé aux participants de jouer des morceaux conçus sur mesure à deux reprises, puis une troisième fois de manière « mécanique », c'est-à-dire, sans ajouter d'expression au-delà de ce qui est indiqué dans la partition.

La conclusion principale qui est d'intérêt ici est que la variabilité à l'intérieur d'une performance (c.-à-d. à quel point le rythme et l'intensité sont irréguliers tout au long de l'interprétation) était plus importante dans les performances musicales que dans les performances mécaniques, et ce en matière de rythme et d'intensité. Il est possible d'en conclure que la régularité de ces paramètres est directement reliée aux intentions expressives de l'interprète, et que de demander une performance mécanique mène à une interprétation plus « régulière ».

Titre		The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance	
Auteur(s)		Ericsson, K.A., Krampe, R. et Tesch-Römer, C.	Date
			1993
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
12 pianistes avancés et 10 pianistes amateurs	J.S. Bach <i>Prelude No. 1</i> <i>in C major</i>	3	Aucune
Résultats pertinents			

La section pertinente de cet article pour cette revue compare la stabilité dans trois performances données par 12 pianistes avancés et 10 pianistes amateurs en calculant le coefficient de corrélation entre l'intensité des trois performances pour chaque participant. Le groupe avancé consistait de pianistes étudiant à un conservatoire, alors que les amateurs poursuivaient d'autres vocations et s'exerçaient moins fréquemment. Il fut indiqué aux participants de jouer trois performances identiques.

L'analyse révèle que le coefficient de corrélation moyen chez le groupe amateur est de $r = 0,695$, alors que celui des pianistes avancés atteint $r = 0,866$. Après avoir transformé ces coefficients en score z et effectué une analyse de variance, les auteurs trouvèrent un effet significatif de groupe. Il est donc possible de conclure que les pianistes avancés arrivent à donner des performances plus stables que leurs homologues amateurs.

Titre	A Discussion of the Nature of Pianoforte Damper-Pedalling Together with an Experimental Study of Some Individual Differences in Pedal Performance		
Auteur(s)	Heinlein, C.P.	Date	1929
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
4 pianistes avancés	Schumann <i>Träumerei</i>	2	10 minutes
Résultats pertinents			

Dans cet article, Heinlein étudie la fréquence d'utilisation de la pédale forte chez quatre pianistes avancés. Deux interprétations de *Träumerei* ont été données par chaque pianiste, séparées par un intervalle de 10 minutes. Pour la seconde interprétation, les pianistes ont reçu l'indication de répliquer leur performance précédente.

L'analyse révèle immédiatement qu'aucun participant n'est arrivé à répliquer sa performance précédente, bien que trois d'entre eux avancèrent avoir donné une performance identique. Cela peut être appliqué tant à la fréquence d'utilisation de la pédale (p. ex. de 88 appuis à 67 appuis) qu'à la durée totale des interprétations (p. ex. de 2 minutes et 45 secondes à 3 minutes et 13 secondes). Heinlein remarque que même si les performances étaient différentes, elles étaient tout aussi adéquates en matière de musicalité, c'est-à-dire au niveau artistique. L'auteur conclut qu'en l'absence d'indications fournies par un mentor, les pianistes développent leurs propres stratégies quant à l'utilisation de la pédale, et ces différents usages peuvent mener à des interprétations également convenables.

Titre	The influence of practice on the development of motor skills in pianists: A longitudinal study in a selected motor task		
Auteur(s)	Jabusch, H-C., Alpers, H., Kopiez, R., Vauth, H. et Altenmüller, E.	Date	2009
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
19 pianistes avancés	Gamme de do majeur	De 10 à 15 par condition	Environ 27 mois
Résultats pertinents			

Dans cet article, la régularité du rythme lors de l'exécution de gammes fut évaluée au cours de deux séances séparées par une durée moyenne de 27 mois. La régularité du rythme fut déterminée à l'aide d'un score intitulé MIOI, qui représente l'écart type moyen des IOIs pour toutes les gammes jouées. Un score bas indique une irrégularité rythmique plus importante, et vice-versa. La différence entre la régularité rythmique des deux séances fut établie à l'aide d'un score intitulé MIOI-d, qui représente la médiane des différences de MIOI entre les deux séances.

Une comparaison entre les scores MIOI récoltés lors des deux séances révèle une corrélation de $r = 0,82$, ce qui suggère une stabilité considérable de la régularité rythmique chez les participants. Chez certains participants, la régularité rythmique diminua entre les deux séances, tandis que le contraire fut observé chez d'autres participants. L'analyse révèle une corrélation entre le MIOI-d et le total d'heures de répétition accumulé de $r = -0,68$, ce qui indique que les pianistes ayant répété plus fréquemment ont démontré moins d'irrégularité rythmique lors du second test.

Ces valeurs obtenues lorsque comparées aux données récoltées dans Jabusch et collègues (2007) chez des enfants âgés de 8 à 17 ans semblent suggérer que l'irrégularité rythmique est plus prononcée chez les enfants et les adolescents. Cette comparaison est toutefois limitée puisque le tempo employé dans Jabusch et collègues (2007) était moins rapide.

Titre	Quantification of focal dystonia in pianists using scale analysis		
Auteur(s)	Jabusch, H-C., Vauth, H. et Altenmüller, E.	Date	2004
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
8 pianistes atteints de dystonie focale et 8 en bonne santé	Gamme de do majeur	De 10 à 15 par condition	N/A

Résultats pertinents

Cet article introduit la méthode d'analyse de gamme (*Scale Analysis*) qui sera fréquemment utilisée dans la recherche subséquente. Pour ce faire, il fut demandé à des pianistes en bonne santé et des pianistes atteints de dystonie focale de jouer 10-15 gammes consécutives de do majeur. L'écart type moyen de quatre variables fut évalué : l'intensité (VEL), la durée des notes (DUR), les IOIs, et l'articulation (OVL).

Une différence significative fut trouvée entre les deux groupes en matière de la durée des notes et des IOIs, où ces valeurs et leurs écarts types étaient plus importants chez le groupe de pianistes atteints de dystonie focale. L'analyse révèle aussi une asymétrie plus prononcée entre les deux mains chez le groupe de pianistes atteints de dystonie focale. La régularité rythmique se voit donc un facteur permettant d'évaluer l'amplitude de la dystonie focale ainsi que le progrès du traitement.

Titre	Biographical predictors of music-related motor skills in children pianists		
Auteur(s)	Jabusch, H-C., Yong, R., et Altenmüller, E.	Date	2007
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
30 enfants âgés entre 8 et 17 ans	Gamme de do majeur	De 10 à 15 par condition	N/A

Résultats pertinents

Cette étude utilise l'analyse de gamme telle que décrite dans Jabusch et collègues (2004) afin d'évaluer l'influence de certains facteurs sur la régularité du rythme chez des jeunes participants.

L'analyse révèle une corrélation modérée entre la régularité du rythme et le temps de répétition quotidien, le temps de répétition total et la durée de l'éducation pianistique. Ces résultats suggèrent un lien entre l'expertise et la variabilité, même à un jeune âge.

Titre	Practice Makes Too Perfect: Fluctuations in Loudness Indicate Spontaneity in Musical Improvisation		
Auteur(s)	Keller, P., Weber, A. et Engel, A.	Date	2011
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
6 pianistes avancés	3 improvisations jouées par les participants	2	4-12 semaines

Résultats pertinents

Six pianistes avancés spécialisés en improvisation jazz ont d'abord joué trois improvisations de 30-60 secondes dans différents styles (*blues*, *swing* et *bossa nova*). Les participants ont par la suite été réinvités 4 à 12 semaines plus tard, et il leur fut demandé d'imiter leurs improvisations précédentes. Les participants ont eu l'opportunité d'écouter leurs compositions et de répéter pour une durée illimitée.

Les auteurs ont choisi d'évaluer la variabilité du rythme et de l'intensité à l'aide d'une mesure d'entropie (H), c'est-à-dire une mesure du caractère aléatoire d'une distribution de probabilité. L'analyse a révélé que l'intensité était plus sujette à varier durant une performance improvisée que lors d'une imitation. Quant au rythme, ce même résultat ne fut observé que dans le style *bossa nova*, avec lequel les participants étaient moins familiers. Ces résultats suggèrent que la variabilité à l'intérieur d'une interprétation est plus importante lorsqu'il s'agit d'une improvisation que d'une imitation, et que des pianistes avancés ne peuvent pas répliquer leurs compositions après une durée de plusieurs semaines, et ce, même après une période de répétition illimitée et lorsque indiqué de reproduire chaque détail audible.

Titre	No disadvantage for left-handed musicians: The relationship between handedness, perceived constraints and performance-related skills in string players and pianists		
Auteur(s)	Kopiez, R., Jabusch, H-C., Galley, N., Homann, J-C., Lehmann, A. C. et Altenmüller, E.	Date	2012
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
19 pianistes avancés	Gamme de do majeur	De 10 à 15 par condition	N/A
Résultats pertinents			

Cet article visait à évaluer l'impact de la main dominante sur divers aspects de la performance musicale. L'expérience pertinente de cet article pour cette thèse a évalué la régularité du rythme lors de l'exécution de gammes chez 19 pianistes, dont 10 droitiers et 9 gauchers.

L'analyse n'a révélé aucune différence en matière de régularité du rythme entre les deux groupes. Cependant, une tendance générale fut identifiée, où les gammes jouées avec la main droite présentaient moins de variabilité que celles jouées avec la main gauche, et ce, tant pour les gauchers que pour les droitiers.

Les auteurs ont aussi évalué l'impact des heures de répétition accumulées et la fréquence actuelle de répétition sur la régularité. Une corrélation a pu être établie entre ces deux facteurs et la régularité des gammes ascendantes jouées avec la main droite, où plus le nombre d'heures de répétition était bas, moins le rythme était stable lors de l'exécution.

Titre	Maintaining excellence: deliberate practice and elite performance in young and older pianists		
Auteur(s)	Krampe, R. T. et Ericsson, K. A.	Date	1996
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
Quatre groupes de 12 pianistes, selon la combinaison de deux facteurs : âge (jeune/âgé) et expertise (amateur/expert)	J.S. Bach <i>Prelude No. 1 in C major</i>	3	Aucune
Résultats pertinents			

La section pertinente de cet article pour cette revue est similaire à Ericsson et collègues (1993) et compare la stabilité de trois performances données par 48 pianistes. Il fut indiqué aux participants de jouer trois performances de manière identique.

L'analyse des performances démontre que les experts ont commis moins d'erreurs que les amateurs. Une comparaison de la variabilité moyenne de l'intensité à l'intérieur d'une performance était plus importante chez les experts, indiquant que ces derniers varient plus largement l'intensité de leurs performances. Le calcul des coefficients de corrélation entre les trois performances démontre cependant que ces variations sont mieux systématiquement répliquées au travers de trois interprétations chez les experts que chez les amateurs. Cette différence entre les groupes n'était toutefois pas significative lorsque la stabilité du rythme entre les trois interprétations fut comparée.

Titre	The Piano Keyboard as Task Constraint: Timing Patterns of Pianists' Scales Persist Across Instruments		
Auteur(s)	Lipke-Perry, T., Dutto, D. et Levy, M.	Date	2019
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
7 pianistes avancés	Gamme de do majeur	10	N/A

Résultats pertinents

Il fut demandé à sept pianistes avancés de jouer 10 gammes de do majeur bimanuelles consécutives, deux octaves, en mouvement ascendant et descendant et en style legato. Cette procédure fut répétée sur trois pianos possédant différentes caractéristiques; deux numériques et un acoustique.

L'analyse révèle d'abord un profil d'irrégularité rythmique assez spécifique, où certaines variations rythmiques pouvaient être observées aux endroits où la main doit effectuer un changement de position lors de l'exécution de la gamme, par exemple lors du mouvement ascendant lorsque le pouce doit passer en dessous du reste de la main afin de se rendre à la prochaine note. Ces variations étaient présentes dans les performances de gammes aux trois différents pianos.

Les données démontrent également qu'aucune différence significative en matière d'irrégularité rythmique ne fut trouvée entre les conditions, suggérant que les performances de gamme demeurent stables, peu importe l'instrument sur lequel elles sont jouées.

Titre	The Effect of Tonal Structure on Rhythm in Piano Performance		
Auteur(s)	Mackenzie, C. L., Van Eerd, D. L., Graham, E. D., Huron, D. B. et Wills, B. L.	Date	1986
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
5 pianistes avancés	Haydn	3	Aucune
	Sonata in B minor		
	Haydn	3	
	Sonata in B minor (version altérée)		
Résultats pertinents			

Cette étude examine l'influence de la structure tonale sur la régularité du rythme de cinq pianistes à l'intérieur d'une performance. Les participants ont joué à trois reprises un extrait de la Sonate en si mineur d'Haydn, ainsi qu'une version altérée de cet extrait afin de le rendre « atonal ». Les auteurs ont posé l'hypothèse que le rythme soit plus stable dans une interprétation d'un stimulus atonal, puisque la disruption de l'information tonale entraînerait une performance plus méthodique ou sans expression.

L'analyse a toutefois révélé le contraire; les interprétations du stimulus tonal ont été jouées avec un rythme plus régulier que leurs contreparties atonales. Il est possible que la procédure ait eu un impact sur ces résultats, puisque les participants n'étaient pas familiers avec le stimulus avant l'expérience et ont reçu quatre minutes afin de pratiquer les extraits avant de débiter. Néanmoins, ces résultats suggèrent que la régularité rythmique pourrait être influencée par la structure tonale du contenu musical.

Titre	Rhythmic precision in the performance of piano scales: Motor psychophysics and motor programming		
Auteur(s)	Mackenzie, C. L. et Van Eerd, D. L.	Date	1990
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
7 pianistes avancés	Gamme de do majeur	5 par condition	N/A
Résultats pertinents			

Ce document étudie la régularité du rythme et de l'intensité dans l'exécution de gammes de do majeur. La conclusion principale de cette étude est que l'irrégularité rythmique augmente plus le tempo est rapide, et ce, tant pour la main droite que pour la main gauche. Un résultat similaire peut être observé pour l'intensité; plus le tempo était rapide, plus les pianistes appuyaient plus fort sur les touches, donnant ainsi lieu à une augmentation générale de l'intensité ainsi que de l'irrégularité de l'intensité.

Titre	Anatomy of a Performance: Sources of Musical Expression		
Auteur(s)	Palmer, C.	Date	1996
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste professionnel	Mozart <i>Sonata K. 282</i>	1	N/A
Résultats pertinents			

La section pertinente de cet article pour cette revue compare deux répétitions de la première section de la Sonate K.282 (la répétition fait partie d'une seule performance, et non de deux interprétations séparées). Une comparaison de chaque note de la mélodie entre les deux répétitions révèle un coefficient de corrélation de $r = 0,93$ pour le rythme, et de $r = 0,81$ pour l'intensité, démontrant ainsi un haut niveau de stabilité. Bien qu'il est difficile ici de juger quelle proportion de cette variabilité peut être attribuée à des décisions interprétatives du pianiste, ces données démontrent qu'un musicien professionnel peut répliquer le rythme et l'intensité d'un extrait musical avec beaucoup de succès.

Titre	Units of knowledge in music performance		
Auteur(s)	Palmer, C. et Van de Sande, C.	Date	1993
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
16 pianistes avancés	J.S. Bach <i>Three-Part Inventions</i>	10	Aucune

Résultats pertinents

La section pertinente de cet article pour cette revue examine la performance d'extraits provenant de quatre *Three-Part Inventions* de Bach. Dans cinq de ces performances, il fut demandé aux participants de mettre l'accent sur une voix en tant que mélodie, puis de mettre l'accent sur une voix alternative dans les cinq autres interprétations. Les participants ont eu l'occasion de répéter les extraits jusqu'à ce qu'ils se sentent à l'aise de les interpréter pour l'expérience.

L'analyse révèle que la fréquence d'erreurs était moins élevée dans les voix qui étaient accentuées en tant que mélodies. La voix la plus élevée était également moins encline à contenir des erreurs, peu importe s'il s'agissait de la voix mélodique ou non. Ces résultats suggèrent que la variabilité de la fréquence d'erreur pourrait être influencée par les décisions interprétatives du pianiste.

Titre	Sources of timing variations in music performance: A psychological segmentation model		
Auteur(s)	Penel, A. et Drake, C.	Date	1998
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
8 pianistes professionnels	Schumann <i>Träumerei</i>	4	Aucune
Résultats pertinents			

Cette étude compare les huit premières mesures de *Träumerei* jouées par huit pianistes professionnels. Le morceau a d'abord été joué à trois reprises normalement, puis il fut demandé aux participants de donner une interprétation « mécanique », c'est-à-dire sans expression. Les huit premières mesures, jouées à deux reprises à chaque performance (indiquées par la partition), ont été analysées, donnant ainsi lieu à six extraits musicaux, et deux extraits mécaniques par participant.

Le calcul de la variabilité du rythme entre les six extraits musicaux révèle un coefficient de corrélation intra-individuel moyen de $r = 0,89$, avec un minimum de $r = 0,67$ et un maximum de $r = 0,97$. Quant aux extraits mécaniques, le coefficient de corrélation intra-individuel moyen atteint $r = 0,60$, avec un minimum de $r = 0,20$ et un maximum de $r = 0,90$. Ces données indiquent que les pianistes professionnels ont plus de facilité à répliquer du contenu musical que du contenu joué de manière mécanique. Il est possible d'en conclure que les pianistes ont moins de contrôle sur le rythme adopté dans un contexte dépourvu d'expression.

L'analyse révèle aussi que même lorsqu'il est indiqué aux participants de jouer de manière mécanique, certaines variations systématiques peuvent être observées dans leurs interprétations. Selon les auteurs, ces variations pourraient être le résidu de variations prévues dans une interprétation expressive, ou de variations non prévues même dans une interprétation expressive.

Enfin, la variation rythmique à l'intérieur d'une performance était moins importante dans le cadre des interprétations mécaniques que leurs contreparties musicales. Ces résultats concordent avec ceux de Drake et Palmer (1993), ajoutant du poids à la conclusion que le rythme d'une performance mécanique est plus régulier.

Titre		Diversity and commonality in music performance: an analysis of timing microstructure in Schumann's "Träumerei"	
Auteur(s)		Repp, B.	Date
			1992
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
28 enregistrements de pianistes professionnels	Schumann <i>Träumerei</i>	1	N/A
Résultats pertinents			

La section pertinente de cette étude compare le rythme des huit premières mesures de *Träumerei* à leurs répétitions plus tard dans la même interprétation dans 28 enregistrements de pianistes professionnels. Cette analyse révèle un coefficient de corrélation moyen de $r = 0,842$, les données allant d'un minimum de $r = 0,510$ à un maximum de $r = 0,953$.

Cette comparaison, bien sûr, est entre deux répétitions à l'intérieur d'une même interprétation. Il est donc probable qu'une proportion de la variabilité observée soit due à certaines décisions interprétatives, en particulier chez les pianistes où le coefficient de corrélation est plutôt bas. Cependant, plusieurs des coefficients de corrélation calculés surpassent $r = 0,90$, suggérant que les pianistes professionnels peuvent répliquer avec beaucoup de succès un extrait musical.

Titre	On Determining the Basic Tempo of an Expressive Music Performance		
Auteur(s)	Repp, B.	Date	1994
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste professionnelle et 1 pianiste amateur (avancé)	Schumann <i>Träumerei</i>	3 par condition	Aucune
Résultats pertinents			

Dans cette étude, il fut demandé à deux pianistes d'interpréter *Träumerei* à trois reprises à trois différents tempi prédéterminés (pour un total de neuf interprétations). Dans son analyse, l'auteur calcule la proportion de chaque interprétation qui est jouée au tempo désiré.

Les résultats démontrent que la pianiste professionnelle jouait plus fréquemment au tempo prédéterminé que le pianiste amateur. L'auteur rapporte également une variabilité « considérable » entre les trois interprétations de chaque groupe, et ce, pour les deux participants. Cependant, les valeurs exactes ne sont pas rapportées. Il est possible que l'imposition de tempi prédéterminés affecte les interprétations des pianistes d'une manière qui rend plus difficile de répliquer sa performance précédente.

Titre	Acoustics, perception, and production of legato articulation on a digital piano		
Auteur(s)	Repp, B.	Date	1995
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations

8 pianistes avancés	Gammes chromatiques et arpèges d'accords diminués débutant sur do	1	N/A
---------------------	---	---	-----

Résultats pertinents

La section pertinente de cet article pour cette revue examine l'articulation de huit pianistes avancés lors de l'interprétation d'exercices techniques. L'articulation fut quantifiée à l'aide du KOT (*key overlap time*) entre chaque note, c'est-à-dire la durée entre l'appui d'une note et la fin de l'appui de la note précédente. Il est à noter que ces performances ont été jouées sur un piano numérique.

L'analyse des performances révèle des différences considérables entre les participants, le KOT moyen allant de 27ms à 145ms. Aucun effet du genre ou de l'expertise du participant ne fut trouvé. Chaque participant ayant reçu les mêmes instructions et stimuli, ces résultats pourraient indiquer que les pianistes possèdent des stratégies individuelles lorsqu'il en vient à l'articulation.

Un résultat particulièrement intéressant dans le cadre de cette revue est la tendance de l'intensité à augmenter lors de mouvements ascendants et à diminuer lors de mouvements descendants. Cette tendance pourrait donc affecter la régularité de l'intensité lors de l'exécution d'exercices techniques.

Titre	Expressive timing in Schumann's "Träumerei." An analysis of performances by graduate student pianists		
Auteur(s)	Repp, B.	Date	1995
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
10 pianistes avancés	Schumann <i>Träumerei</i>	3	Environ 15 minutes
Résultats pertinents			

Cet article compare le rythme de trois interprétations de *Träumerei* jouées par dix pianistes avancés. Plusieurs comparaisons ont été établies afin d'examiner la stabilité du rythme : d'abord, entre les performances entières, puis seulement entre les huit premières mesures de chaque performance, et enfin entre les huit premières mesures et leurs répétitions à l'intérieur de chaque performance.

Entre les performances entières, l'analyse révèle un coefficient de corrélation moyen de $r = 0,947$, allant d'un minimum de $r = 0,868$ à un maximum de $r = 0,974$. Ces coefficients élevés reflètent une habileté surprenante à jouer un morceau avec un rythme stable d'interprétation en interprétation. Un phénomène similaire peut être observé lorsque seules les huit premières mesures sont comparées (moyenne : $r = 0,907$; min : $r = 0,867$; max : $r = 0,953$) ainsi que la répétition des huit premières mesures à l'intérieur d'une performance (moyenne : $r = 0,899$; min : $r = 0,849$; max : $r = 0,958$).

En particulier, la similarité entre les répétitions des huit premières mesures chez ces participants est comparable à celle de pianistes professionnels ($r = 0,842$, tel qu'établi dans Repp (1992)). Ces données suggèrent que ces pianistes avancés, des étudiants universitaires, arrivent à donner des interprétations tout aussi stables que celles des experts.

Titre	Pedal Timing and Tempo in Expressive Piano Performance: A Preliminary Investigation		
Auteur(s)	Repp, B.	Date	1996
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations

1 pianiste professionnelle et 1 pianiste amateur (avancé)	Schumann <i>Träumerei</i>	3 par condition	Aucune
---	------------------------------	-----------------	--------

Résultats pertinents

Cette étude suit le même protocole que Repp (1994); il fut demandé à deux pianistes d'interpréter *Träumerei* à trois reprises à trois différents tempi prédéterminés (pour un total de neuf interprétations).

Une analyse de l'utilisation de la pédale forte chez les deux pianistes révèle deux profils différents, où la pianiste professionnelle utilisait plus fréquemment la pédale en comparaison au pianiste amateur, et ce, à tous les tempi. Chose particulièrement intéressante, chez les deux participants, l'utilisation de la pédale variait entre les différentes répétitions du morceau au même tempo (p. ex., de 81 utilisations à 92). La comparaison de certaines mesures identiques à l'intérieur d'une même performance révèle une stabilité légèrement plus importante chez le pianiste amateur.

Bien que l'utilisation de la pédale tendait à varier d'interprétation en interprétation, l'auteur souligne que lorsque la pédale est utilisée au même endroit dans plusieurs performances, elle est utilisée de manière similaire.

Titre		The Art of Inaccuracy: Why Pianists' Errors Are Difficult to Hear			
Auteur(s)		Repp, B.		Date	1996
Participant(s)		Stimulus employé		Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
10 pianistes avancés	Schumann <i>Träumerei</i>		3	Environ 15 minutes	
	Debussy <i>La fille aux cheveux de lin</i>		3		
	Chopin <i>Prélude en ré bémol majeur</i>		3		
	Grieg <i>Erotik</i>		3		
Résultats pertinents					

Cette étude examine la présence d'erreurs dans trois interprétations de quatre morceaux joués par des pianistes avancés*. L'étude contient peu d'information quant à la variabilité individuelle de la présence d'erreurs entre les performances chez les participants. Cependant, l'auteur rapporte un total d'erreur qui diffère entre les interprétations d'un même morceau. Ainsi, il est possible d'en déduire que la présence d'erreurs varie de performance en performance.

L'auteur note que certaines des erreurs ont été répétées à chaque interprétation; il est possible qu'avec plus de temps de répétition avant de procéder avec l'expérience, les pianistes aient eu l'occasion de remarquer et d'éliminer ces erreurs. L'analyse révèle aussi que les erreurs de type omission (c.-à-d. des notes indiquées dans la partition, mais qui n'ont pas été jouées) étaient plus stables que les erreurs de type d'intrusion (c.-à-d. des notes qui ne sont pas présentes dans la partition, mais qui ont été jouées). Les erreurs stables avaient tendance à être contextuellement approprié, c'est-à-dire qu'il s'agissait de notes ayant du sens avec l'harmonie ou la mélodie. Les erreurs contextuellement inappropriées, en revanche, étaient moins stables entre les performances.

*Cette étude emploie les mêmes données que Repp (1995b)

Titre	The dynamics of expressive piano performance: Schumann's "Träumerei" revisited		
Auteur(s)	Repp, B.	Date	1996
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
10 pianistes avancés	Schumann <i>Träumerei</i>	3	Environ 15 minutes

Résultats pertinents

Dans cet article, Repp compare l'intensité de trois performances de *Träumerei* donnée par dix pianistes avancés*. Plusieurs corrélations ont été calculées entre diverses sections du stimulus :

	Coefficient de corrélation (<i>r</i>)		
	Moyenne	Min.	Max.
Entre les performances entières	0,836	0,732	0,897
Main droite seulement	0,833	0,702	0,911
Main gauche seulement	0,715	0,655	0,793
Voix soprano seulement	0,788	0,599	0,887
Huit premières mesures seulement	0,863	0,824	0,882
Entre les deux répétitions des huit premières mesures (moyenne des trois performances)	0,841	0,755	0,916

En premier lieu, l'auteur remarque que le coefficient de corrélation moyen entre l'intensité des trois performances est plus bas que celui entre le rythme des trois performances ($r = 0,947$, tel que rapporté dans Repp (1995)), suggérant que les pianistes ont plus de facilité à répliquer un profil rythmique qu'un profil d'intensité. L'auteur souligne également que le coefficient de corrélation moyen est plus bas pour les notes jouées avec la main gauche que celles jouées avec la main droite, suggérant que les pianistes ont moins de contrôle sur l'intensité avec la main gauche.

*Cette étude emploie les mêmes données que Repp (1995b)

Titre		Some Observations on Pianists' Timing of Arpeggiated Chords	
Auteur(s)		Repp, B.	Date
Participant(s)		Stimulus employé	Nombre de répétitions
			Durée séparant les interprétations
10 pianistes avancés			3
8 enregistrements de pianistes professionnels		Grieg <i>Erotik</i>	1
			N/A
Résultats pertinents			

Dans cet article, Repp compare la vitesse d'exécution d'accords arpégés chez des pianistes avancés* et professionnels. Les huit premières mesures du morceau sont suivies d'une répétition quasi note pour note dans les huit mesures suivantes, permettant ainsi d'évaluer la stabilité entre deux répétitions d'un même accord dans la même performance.

L'analyse révèle une stabilité considérable chez les pianistes avancés entre les répétitions d'un même accord, suggérant que ces derniers arrivent à répliquer le rythme d'exécution de ces accords arpégés avec beaucoup de succès. L'auteur rapporte que la stabilité entre les répétitions était comparable entre les pianistes avancés et professionnels, ce qui suggère que l'expertise ne joue pas un rôle sur la variabilité dans ce contexte.

**Cette étude emploie les mêmes données que Repp (1995b)*

Titre		Expressive Timing in a Debussy Prelude: A Comparison of Student and Expert Pianists	
Auteur(s)		Repp, B.	Date
Participant(s)		Stimulus employé	Nombre de répétitions
			Durée séparant les interprétations
10 pianistes avancés			3
10 enregistrements de pianistes professionnels		Debussy <i>La fille aux cheveux de lin</i>	1
			N/A
Résultats pertinents			

Cette étude compare le rythme de performances de *La fille aux cheveux de lin* chez des pianistes avancés* et professionnels. L'analyse démontre que le rythme des pianistes avancés était considérablement stable d'interprétation en interprétation, avec un écart type intra-individuel moyen de 1,2 bpm pour le tempo moyen.

**Cette étude emploie les mêmes données que Repp (1995b)*

Titre	Acoustics, perception, and production of legato articulation on a computer-controlled grand piano			
Auteur(s)	Repp, B.		Date	1997
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations	
9 pianistes avancés	Séquences d'exercices techniques	3	Aucune	
	Persichetti	3		
	<i>Dialogue</i>			
Résultats pertinents				

Ce document visant à répliquer l'étude de Repp (1995a) contient deux expériences qui sont d'intérêt pour cette revue. D'abord, il fut demandé aux participants de jouer plusieurs séquences d'exercices techniques. Ces séquences variaient en position de départ, en tempo, et en nombre de demi-tons séparant les notes. Certaines séquences étaient jouées avec la main droite et la main gauche, séparément. L'articulation des pianistes était évaluée à l'aide des KOTs.

Tout comme dans Repp (1995a), l'analyse révèle une grande diversité dans le KOT moyen des participants, allant de 40ms à 140ms. Un résultat particulièrement pertinent est la tendance de l'irrégularité du KOT à augmenter plus le KOT moyen du participant était élevé. De plus, puisque plusieurs des résultats de Repp (1995a) ont été répliqués en dépit que cette expérience fut conduite sur un piano numérique, il est possible que les stratégies individuelles quant à l'articulation *legato* ne soient pas adaptées en réponse à des facteurs extramusicaux.

La seconde expérience dans ce document visait à évaluer l'articulation dans trois performances de *Dialogue* de Persichetti. En établissant les KOTs de chaque participant tout au long de l'interprétation, il fut possible d'établir des profils d'articulation individuels. L'analyse démontre que tout comme dans les exercices techniques, les profils d'articulation variaient largement entre les participants. La stabilité des KOTs entre les répétitions du morceau ne fut pas rapportée.

Titre	Variability of timing in expressive piano performance increases with interval duration			
Auteur(s)	Repp, B.		Date	1997
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations	
10 pianistes avancés	Schumann <i>Träumerei</i>	3	Environ 15 minutes	
	Debussy <i>La fille aux cheveux de lin</i>	3		
Résultats pertinents				

Cet article examine plus attentivement la relation entre la variabilité du rythme sur plusieurs interprétations* et la durée des intervalles, c'est-à-dire la durée entre deux notes ou l'IOI.

L'analyse principale de cet article démontre que plus la valeur de l'IOI augmente, plus la variabilité du rythme entre les performances est élevée. Ces résultats signifient que dans une interprétation très expressive, la précision rythmique d'un pianiste diminue plus la durée séparant deux notes est importante. L'auteur souligne cependant qu'il s'agit ici de performances musicales peu préparées par des pianistes avancés, et qu'il est donc possible que cette variabilité soit moins importante chez des pianistes professionnels si l'intention est de répliquer la même performance à plusieurs reprises.

*Cette étude emploie les mêmes données que Repp (1995b)

Titre		Control of Expressive and Metronomic Timing in Pianists	
Auteur(s)		Repp, B.	Date
			1999
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
6 pianistes avancés	Chopin <i>Étude en mi majeur</i>	11	Aucune
Résultats pertinents			

La section pertinente de cet article vient appuyer les résultats décrits dans Repp (1997); l'analyse de trois répétitions de l'*Étude en mi majeur* de Chopin jouées par 6 pianistes avancés révèle que la variabilité de l'IOI augmente en fonction de la durée de ce même IOI. Les résultats démontrent également que les pianistes possèdent des profils rythmiques individuels et arrivent à répliquer ces profils avec beaucoup de succès d'interprétation en interprétation.

Titre	Clinical applications of MIDI technology		
Auteur(s)	Salmon, P. et Newark, J.	Date	1989
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
3 pianistes de divers niveaux d'expertise	Prélude baroque basé sur <i>Vater unser im Himmelreich</i>	1	N/A

Résultats pertinents

Cet article discute des possibilités de la technologie MIDI (*musical instrument digital interface*) en recherche, et examine six répétitions d'un court thème à l'intérieur d'un prélude baroque.

Dans l'analyse de la performance initiale du thème, l'auteur remarque un écart type du KOT plus important (et donc plus d'irrégularité) chez le pianiste possédant le moins d'expérience. Un phénomène similaire fut observé pour la durée de chaque note du thème (toutes de durées égales dans la partition); le pianiste possédant le moins d'expérience démontrait le plus d'irrégularité rythmique dans sa performance. Les résultats ont aussi démontré une régularité plus importante de l'intensité chez le pianiste le plus avancé. Quant à la stabilité du thème au cours de plusieurs répétitions, l'auteur souligne une stabilité rythmique importante chez le pianiste le plus avancé. Ces résultats suggèrent une influence de l'expertise sur la régularité et la stabilité de certains paramètres.

Titre	Performances of Chopin, Bach, and Bartok: Studies in motor programming		
Auteur(s)	Shaffer, L.H.	Date	1981
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste professionnel	J.S. Bach <i>Fugue VII</i>	2	Aucune

Résultats pertinents

La section pertinente de ce document examine le rythme de deux performances données par un pianiste professionnel. Ces interprétations n'étaient pas préparées, et il ne fut pas indiqué au participant de jouer deux interprétations identiques ou différentes.

D'abord, le rythme était régulier à l'intérieur des deux performances, les déviations de la durée de chaque phrase n'atteignant seulement que 5 % et 6 % de la durée moyenne. L'auteur souligne que le rythme et le profil rythmique étaient très similaires entre les deux interprétations; la différence entre les durées totales des deux performances n'étant que 356ms.

Cette analyse a également examiné la corrélation du rythme entre les performances à différents niveaux de la structure du morceau. Les valeurs moyennes rapportées sont de $r = 0,84$ à la phrase, $r = 0,74$ à la mesure, $r = 0,57$ à la demi-mesure et $r = 0,54$ au quart de mesure. Cette tendance du coefficient de corrélation à augmenter lorsque les comparaisons sont effectuées entre des unités plus larges suggère que le contrôle du rythme entre plusieurs interprétations est hiérarchique.

Titre	On the One Hand or on the Other: Trade-Off in Timing Precision in Bimanual Musical Scale Playing.		
Auteur(s)	Van Vugt, F. et Altenmüller, E.	Date	2019
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
34 pianistes avancés	Gamme de do majeur	Environ 30 par condition	N/A
Résultats pertinents			

Cette étude examine la régularité du rythme dans l'exécution de gammes jouées avec les mains séparées et mains ensemble chez 34 pianistes avancés.

L'analyse révèle un effet significatif sur la variabilité en fonction de la main qui joue la gamme, où la main gauche est généralement plus irrégulière. De plus, le rythme de la main gauche était plus irrégulier dans la condition bimanuelle que dans la condition unimanuelle, et également plus irrégulier dans les gammes descendantes que les gammes ascendantes. Ces phénomènes n'étaient pas présents chez la main droite, suggérant que lors de l'exécution de gammes bimanuelles, la régularité du rythme de la main droite est priorisée.

Titre	Playing beautifully when you have to be fast: spatial and temporal symmetries of movement patterns in skilled piano performance at different tempi		
Auteur(s)	Van Vugt, F., Furuya, S., Vauth, H., Jabusch, H-C. et Altenmüller, E.	Date	2014
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
19 pianistes avancés	Gamme de do majeur	Environ 15 par condition	N/A
Résultats pertinents			

Cette étude examine attentivement la relation entre le tempo et la régularité rythmique dans l'exécution de gammes. Pour ce faire, il fut demandé à 19 pianistes avancés de jouer des gammes de do majeur à différents tempi.

Les résultats de cet article ajoutent aux conclusions trouvées par Mackenzie et Van Eerd (1990) quant aux déviations rythmiques et comment ces dernières changent en fonction du tempo auquel la gamme est jouée. Les auteurs proposent un modèle à deux facteurs permettant d'expliquer ces déviations, soit un facteur neuromusculaire et un facteur de phrase (*phrasal*). Lorsque le tempo est lent, les déviations rythmiques contribuant à l'irrégularité sont plus prononcées au début et à la fin des gammes, ressemblant ainsi à la performance d'une phrase musicale, où le rythme aux extrémités est fréquemment altéré. Les auteurs avancent que puisque les pianistes sont moins restreints par la demande technique puisque la gamme est jouée à un tempo lent, ils préfèrent créer un son esthétiquement plaisant, imitant donc le profil rythmique d'une phrase musicale.

Le facteur neuromusculaire, quant à lui, explique les déviations rythmiques qui sont plus prononcées aux tempi rapides. Ces dernières apparaissent aux endroits où la main doit effectuer une manœuvre plus complexe, par exemple, lorsque le pouce doit passer en dessous des autres doigts afin de se rendre à la prochaine note. Puisque ces manœuvres requièrent un certain laps de temps fixe à accomplir, il est plus complexe de conserver un rythme régulier à ces endroits plus le tempo est rapide et, de ce fait, plus la demande technique est exigeante.

Titre	Fingers Phrase Music Differently: Trial-to-Trial Variability in Piano Scale Playing and Auditory Perception Reveal Motor Chunking		
Auteur(s)	Van Vugt, F., Jabusch, H-C. et Altenmüller, E.	Date	2012
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
34 pianistes avancés	Gammes de do majeur, la mineur et fa dièse majeur	Environ 30 par condition	N/A
Résultats pertinents			

Les auteurs présentent ici une nouvelle manière d'évaluer la variabilité dans l'exécution de gamme. Il fut demandé à 34 pianistes de jouer plusieurs séries de 30 gammes ascendantes et descendantes, sous différentes conditions : (i) do majeur avec la main droite, (ii) do majeur avec la main gauche, (iii) la mineur avec la main droite, (iv) fa dièse majeur avec la main droite, (v) do majeur les mains ensembles.

Plutôt que d'utiliser l'écart type des IOIs en tant que mesure d'irrégularité, les auteurs proposent une nouvelle technique où le rythme d'une gamme jouée est comparé au rythme d'une gamme jouée idéalement (c.-à-d. avec une régularité parfaite). Il est ainsi possible de comparer chaque note individuellement et de déterminer comment ces dernières dévient au niveau du rythme.

L'analyse révèle deux types de déviations. Les premières sont les variations systémiques qui apparaissent lors de l'exécution de chaque gamme; elles se manifestent surtout par un ralentissement au début et à la fin de chaque gamme, indiquant que les gammes sont jouées comme une phrase musicale.

Le second type de déviations concerne les variations qui ne surviennent pas systématiquement lors de la performance de gammes, étant possiblement une conséquence de la variabilité du mouvement. Ces déviations apparaissent particulièrement fréquemment aux extrémités des octaves, ce qui suggère que la performance de gamme est séparée en séquences motrices de la longueur d'une octave.

Titre	Individuality That is Unheard of: Systematic Temporal Deviations in Scale Playing Leave an Inaudible Pianistic Fingerprint		
Auteur(s)	Van Vugt, F., Jabusch, H-C. et Altenmüller, E.	Date	2013
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
8 pianistes avancés	Gamme de do majeur	De 10 à 15 gammes	15 minutes
20 pianistes avancés		par condition	Environ 27 mois
Résultats pertinents			

Cet article contient deux expériences pertinentes pour cette revue et propose un algorithme permettant de comparer les irrégularités rythmiques dans la performance de gammes chez les pianistes.

Il fut demandé à huit pianistes de jouer une quinzaine de gammes de do majeur avec la main droite, puis la main gauche. Cette procédure fut répétée après 15 minutes. La conclusion principale de cette analyse est que les profils d'irrégularité rythmique sont très individuels; deux profils du même pianiste provenant de différentes séances sont plus similaires que les profils de deux différents pianistes. L'algorithme développé par les auteurs fut en mesure d'identifier et jumeler les performances individuelles de chaque pianiste entre les deux séances, et ce, tant en utilisant la distance euclidienne de vecteurs représentant l'irrégularité rythmique des deux performances, ainsi qu'en utilisant une corrélation Pearson entre les paires de déviations rythmiques.

Il est à noter que l'algorithme compare les profils d'irrégularité rythmique, et non simplement l'amplitude de l'irrégularité rythmique (p. ex. en calculant l'écart type des IOIs). Il est possible d'en conclure que la variabilité se manifeste de manière qualitativement différente chez chaque pianiste.

Cette expérience fut répétée avec les données récoltées par Jabusch et collègues (2009) où les deux séances étaient séparées par une durée moyenne de 27,8 mois. Lorsque les performances de la deuxième séance étaient données à l'algorithme, ce dernier fut en mesure de jumeler correctement les performances de la première séance dans 13 cas sur 20. L'analyse révèle aussi une corrélation entre le temps de répétition et la similarité entre les profils d'irrégularité rythmique de la main droite. Cette corrélation n'était pas significative pour la main gauche. Ces données suggèrent néanmoins que les déviations rythmiques sont mieux reproduites après une longue durée plus le temps de répétition est élevé.

Titre	The influence of chronotype on making music: circadian fluctuations in pianists' fine motor skills		
Auteur(s)	Van Vugt, F., Treutler, K., Altenmüller, E. et Jabusch, H-C.	Date	2013
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
22 pianistes avancés	Gamme de do majeur	Environ 15 par condition	1 journée
Résultats pertinents			

Dans le cadre de cette étude, il fut demandé à 22 pianistes de jouer une trentaine de gammes de do majeur, mains séparées (15 par main). Les observations ont été complétées sur deux journées consécutives, le matin (AM) et en après-midi (PM). Le chronotype des participants fut évalué afin d'établir des comparaisons entre les groupes.

Les données révèlent d'abord une instabilité rythmique plus prononcée chez la main gauche que chez la main droite. L'analyse principale, quant à elle, démontre un effet significatif du chronotype sur la stabilité des performances; les pianistes avec un chronotype du type soir présentaient une meilleure stabilité rythmique dans les séances PM que les séances AM, tandis que les pianistes au chronotype du type matin ne présentaient aucune différence en matière de stabilité entre les séances AM et PM.

Un effet similaire fut trouvé pour la régularité de l'intensité, où les pianistes au chronotype du type matin démontraient une régularité plus accrue dans les séances AM, et vice-versa pour l'autre groupe.

Il est possible d'en conclure que la variabilité de la performance de gammes est influencée par les fluctuations du rythme circadien, ce qui pourrait avoir d'importantes répercussions sur les procédures expérimentales à employer dans l'avenir.

Titre	Structural neuroplasticity in expert pianists depends on the age of musical training onset		
Auteur(s)	Vaquero, L., Hartmann, K., Ripollés, P., Rojo, N., Sierpowska, J., François, C., Càmara, E., Van Vugt, F., Mohammadi, B., Samii, A., Münte, T., Rodríguez-Fornells, A. et Altenmüller, E.	Date	2016
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
36 pianistes professionnels	Gammes de do majeur, la mineur et fa dièse majeur	Environ 30 par condition	N/A

Résultats pertinents

Cette étude étudie la régularité rythmique dans la performance de gamme chez des pianistes professionnels en fonction de l'âge de début des leçons. L'analyse révèle que les participants ayant débuté des leçons de piano avant l'âge de sept ans présentaient une meilleure régularité rythmique que les pianistes ayant débuté après l'âge de sept ans. Ces résultats sont jumelés à une observation de différences structurelles entre les cerveaux des deux groupes, suggérant ainsi un lien entre la plasticité entraînée par l'apprentissage du piano et la performance pianistique.

Titre	The influence of the tempo of playing on the rhythmic structure studied at pianists playing scales		
Auteur(s)	Wagner, C.	Date	1971
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de gammes jouées	Durée séparant les interprétations
11 pianistes avancés ou professionnels	Gamme de do majeur	N/A	N/A
Résultats pertinents			

Cette étude examine l'influence du tempo sur la régularité du rythme lors de l'exécution de gammes. Pour ce faire, il fut demandé à 11 participants de jouer une gamme de do majeur à une multitude de différents tempi, allant de 2 touches/seconde à 13.9 touches/seconde, puis une performance aussi rapide que possible.

L'analyse révèle un lien particulier entre le tempo et la régularité du rythme, où l'irrégularité est plus prononcée aux tempi extrêmes, que ce soit une vitesse lente ou rapide. Les vitesses moyennes (6-8 touches/seconde), quant à elles, présentaient le moins d'irrégularité rythmique. Ces données suggèrent ainsi qu'un tempo de 6-8 touches/seconde est idéal afin de maximiser la régularité rythmique. De plus, les profils d'irrégularité rythmique étaient beaucoup plus variés aux tempi lents qu'aux tempi moyens et rapides, suggérant que la formation d'un programme moteur spécialisé pour l'exécution de gammes nécessite une certaine vitesse minimale.

Titre	Piano Learning and Programed Instruction		
Auteur(s)	Wagner, C., Piontek, E. et Teckhaus, L.	Date	1973
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
3 pianistes de divers niveaux d'expertise	Gamme de do majeur Main droite	1	N/A

Résultats pertinents

La section pertinente de ce document compare la régularité du rythme lors de l'exécution d'une gamme de do majeur chez trois pianistes, soit un novice, un pianiste intermédiaire et un expert. L'analyse démontre une corrélation entre la régularité du rythme et le niveau d'expertise du participant, où le pianiste le plus avancé démontrait le plus de régularité dans sa performance. Ces résultats suggèrent donc un lien entre le niveau d'expertise et la variabilité.

Titre	Expressive Timing and Dynamics in Real and Artificial Musical Performances: Using an Algorithm as an Analytical Tool		
Auteur(s)	Windsor, W. L. et Clarke, E.	Date	1997
Participant(s)	Stimulus employé	Nombre de répétitions	Durée séparant les interprétations
1 pianiste professionnel	Schubert <i>Impromptu en sol bémol majeur</i>	3	Aucune

Résultats pertinents

Dans le cadre de cet article, il fut demandé à un pianiste professionnel de donner trois représentations de *L'Impromptu en sol bémol majeur* de Schubert, dont une interprétation « retenue » (« *restrained* »), c'est-à-dire sans expression. Cette performance fut utilisée à des fins de comparaisons.

Une régression du rythme entre les deux premières performances donna un résultat de $R^2 = 0,848$, tandis qu'une régression du rythme entre la première performance et la performance retenue donna un résultat de $R^2 = 0,626$. Une analyse entre les mêmes paires d'interprétations, mais en comparant l'intensité, donna des résultats de $R^2 = 0,719$ et $R^2 = 0,736$. Ces résultats suggèrent d'abord qu'il existe plus de similarités rythmiques entre les performances musicales qu'entre une performance musicale et une performance retenue. De plus, ces données semblent confirmer l'hypothèse que le profil rythmique est mieux répliqué sur plusieurs répétitions d'un même morceau que le profil d'intensité.

3.2. Résumé des résultats

Les tableaux suivants (**Tableaux 3.1 et 3.2**) ont pour objectif de résumer la majorité des informations présentées dans la section précédente. Ces informations sont organisées selon le paramètre et le contexte dans lequel il est étudié, soit l'interprétation de morceaux ou l'exécution d'exercices techniques. La seconde colonne contient les découvertes générales quant à la variabilité de la performance pianistique ; certains de ces phénomènes et leurs implications pour la recherche seront abordés dans la discussion. La troisième colonne contient les informations concernant l'influence de l'expertise, et donc pertinentes à la troisième question de recherche. La dernière colonne contient quant à elle les informations en lien à la variabilité en fonction de la durée séparant les répétitions, ce qui sera pertinent pour la quatrième question de recherche.

Les outils techniques employés par les études mentionnées dans ces tableaux sont rapportés en utilisant la légende suivante :

[T] La technologie MIDI

[E] Systèmes électromécaniques

[A] Systèmes acoustiques

[M] Analyse du mouvement

Tableau 3.1. Tableau récapitulatif des phénomènes observés jusqu'à présent concernant la variabilité de paramètres de la performance pianistique lors de l'interprétation de morceaux.

Paramètre	Phénomènes observés		
	Générales	En lien à l'expertise	En lien à la durée séparant les répétitions
<i>La présence d'erreurs</i>	La présence d'erreurs varie même chez des pianistes avancés (Chaffin et al., 2007[A]; Repp, 1996b[T])	Les novices font plus d'erreurs et commettent différents types d'erreurs que les experts (Drake & Palmer, 2000[T]; Krampe & Ericsson, 1996a[T])	
<i>L'intensité</i>	L'intensité des notes jouées avec la main droite est plus stable que l'intensité des notes jouées avec la main gauche (Repp, 1996c[T])	La régularité et la stabilité de l'intensité augmentent avec le niveau d'expertise (Ericsson et al., 1993[T]; Krampe & Ericsson, 1996a[T]; Salmon & Newmark, 1989[T])	Chez des pianistes avancés, l'intensité est très stable entre plusieurs performances d'un même morceau à court terme (Repp, 1996c[T])
<i>L'articulation</i>		L'irrégularité de l'articulation est plus prononcée chez les amateurs (Salmon & Newmark, 1989[T])	
<i>L'utilisation de la pédale forte</i>	L'utilisation de la pédale forte varie même chez des pianistes avancés (Heinlein, 1929[E]; Repp, 1996a[T])		
<i>Le rythme</i>	- Les débuts et fins de phrase sont moins stables que les milieux de phrase (Demos et al., 2016[A]) - 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 et al., 2006[A], 2007[A]; Chaffin & Logan, 2006[A]; Clarke, 1982, 1985[E]) - L'instabilité augmente avec le tempo (Clarke, 1982[E]) - Les performances mécaniques (sans expression) sont plus régulières (Drake & Palmer, 1993[T]; Penel & Drake, 1998[T]) - Plus la valeur d'un IOI est grande, plus cet IOI est instable au cours de plusieurs interprétations (Repp, 1997d[T], 1999[T]) - Le profil rythmique est mieux répliqué que le profil d'intensité entre plusieurs interprétations (Windsor & Clarke, 1997[T])	- La stabilité du rythme de pianistes avancés (étudiants universitaires) est comparable à celle de pianistes professionnels (Repp, 1995b[T]) - La régularité et la stabilité du rythme augmentent avec l'expertise (Salmon & Newmark, 1989[T])	Chez des pianistes avancés, le rythme est très stable entre plusieurs performances d'un même morceau à court terme (Clarke, 1985[E]; Penel & Drake, 1998[T]; Repp, 1995b[T], 1999[T]; Shaffer, 1981[E]) et à moyen terme (Chaffin et al., 2007[A])

Tableau 3.2. Tableau récapitulatif des phénomènes observés jusqu'à présent concernant la variabilité de paramètres de la performance pianistique lors de l'exécution d'exercices techniques.

Paramètre	Phénomènes observés		
	Générales	En lien à l'expertise	En lien à la durée séparant les répétitions
<i>L'intensité</i>	- La régularité de l'intensité est influencée par le tempo (MacKenzie & Van Eerd, 1990[E]) - L'intensité des notes jouées avec la main droite est plus régulière que l'intensité des notes jouées avec la main gauche (Van Vugt, Treutler, et al., 2013[T]) - La régularité de l'intensité est influencée par le chronotype du pianiste (Van Vugt, Treutler, et al., 2013[T])		
<i>L'articulation</i>	- L'articulation varie grandement entre différents pianistes (Repp, 1995a[T]) - Il existe une corrélation positive entre le KOT moyen d'un pianiste et l'irrégularité des KOTs (Repp, 1997c[T])		
<i>Le rythme</i>	- Il n'existe pas de différence en matière de régularité entre les pianistes gauchers et droitiers (Kopiez et al., 2012[T]) - La régularité est influencée par certains facteurs biomécaniques (Lipke-Perry et al., 2019[M]; Van Vugt et al., 2014[T]) et certains facteurs expressifs (Van Vugt et al., 2014[T]) - La régularité du rythme est influencée par le tempo (MacKenzie & Van Eerd, 1990[E]; Van Vugt et al., 2014[T]; Wagner, 1971[E]) - Le rythme des notes jouées avec la main droite est plus régulier que le rythme des notes jouées avec la main gauche (Kopiez et al., 2012[T]; MacKenzie & Van Eerd, 1990[E]; Van Vugt, Treutler, et al., 2013[T]; Van Vugt & Altenmuller, 2019[T]) - La régularité du rythme est influencée par le chronotype du pianiste (Van Vugt, Treutler, et al., 2013[T])	- L'irrégularité rythmique est plus prononcée chez les enfants (8-17 ans) que les adultes (Jabusch et al., 2007[T], 2009[T]) - L'irrégularité rythmique diminue plus le temps de répétition accumulé est élevé (Jabusch et al., 2007[T], 2009[T]; Kopiez et al., 2012[T]; Wagner et al., 1973[E]). - L'irrégularité rythmique est moins prononcée chez les pianistes ayant débutés les leçons avant l'âge de 7 ans (Vaquero et al., 2016[T])	Chez des pianistes avancés, la régularité rythmique est particulièrement stable à court terme (Van Vugt, Jabusch, et al., 2013[T]) et à très long terme (plus d'un an) (Jabusch et al., 2009[T]; Van Vugt, Jabusch, et al., 2013[T])

4. Synthèse et discussion

Cette revue exploratoire visait à effectuer une synthèse de la recherche sur la variabilité de la performance pianistique afin de répondre à quatre questions principales quant aux paramètres de la performance pianistique : (i) quels outils techniques ont été utilisés afin de les mesurer; (ii) quelles méthodes d'analyse ont été employées afin de mesurer leur variabilité; (iii) que pouvons-nous conclure quant au rôle de l'expertise sur leur variabilité; (iv) que pouvons-nous conclure quant au nombre d'essais minimal afin d'obtenir une évaluation fiable de ces paramètres.

Cette revue avait d'abord comme objectif de déterminer quels paramètres de la performance pianistique ont été identifiés et étudiés dans la littérature existante. Quarante-sept documents contenant de l'information quant à la variabilité de la performance pianistique ont été retenus pour cette revue. Parmi ces documents, cinq paramètres ont été identifiés : la présence d'erreurs (4 études), l'intensité (12 études), l'articulation (6 études), l'utilisation de la pédale forte (2 études), et le rythme (35 études). 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 (17 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 interprétatives. 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 & Palmer, 1993; Repp,

1995a, 1997d). 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.

La première question de recherche visait à établir quels outils techniques ont été utilisés afin de mesurer ces paramètres. Cette revue a identifié quatre outils principaux afin d'accomplir cet objectif : la technologie MIDI, les systèmes électromécaniques, les systèmes acoustiques, et l'analyse du mouvement. La dominance de la technologie MIDI ainsi que les avantages et les désavantages de chaque outil seront discutés.

La seconde question de recherche, quant à elle, cherchait à identifier les méthodes d'analyse avec lesquelles la variabilité de ces paramètres a été évaluée. Tout comme dans le domaine de la biomécanique, les méthodes employées dans le domaine de la performance pianistique ont pu être regroupées en trois catégories majeures : les statistiques descriptives, les mesures continues et les nouvelles approches. Les manières dont ces méthodes d'analyse ont été appliquées dans le domaine de la musique seront discutées.

Lorsqu'il en vient à la troisième question de recherche, cette revue a identifié 9 études ayant examiné le lien entre l'expertise et la variabilité, soit 4 dans le contexte de l'exécution d'exercices techniques et 5 dans le cadre de l'interprétation de morceaux. Les données de ces études permettent d'arriver à la conclusion générale que la variabilité de la performance pianistique diminue plus le niveau d'expertise est élevé, et ce dans les deux contextes. Les implications de ce phénomène seront discutées plus en détail dans la section appropriée.

Pour ce qui a trait à la quatrième question de recherche, cette revue n'a identifié aucune étude dont le but était de déterminer le nombre d'essais minimal afin d'obtenir une évaluation

fiable d'un des paramètres de la performance pianistique. Il est cependant possible de formuler certaines spéculations basées sur les données obtenues jusqu'à présent quant à la variabilité de la performance pianistique et les avancées faites à ce sujet dans le domaine de la biomécanique sportive. Cette thèse offrira donc certaines recommandations quant à cet enjeu.

Enfin, cette revue avait également pour objectif d'identifier les lacunes quant à notre compréhension de la variabilité de la performance pianistique ainsi que les défis reliés à l'étude de cette même variabilité. Les lacunes soulevées dans cette revue peuvent toutes être reliées aux sujets discutés dans les quatre questions de recherche précédentes (à l'exception de la première), et seront donc élaborées séparément dans chacune de ces sections. Les défis, quant à eux, seront abordés à la fin de cette discussion.

4.1. Outils de mesure des paramètres

Depuis un peu plus d'un siècle, plusieurs outils techniques ont été développés afin d'examiner la performance pianistique. Un outil qui a fait son apparition vers la fin des années 80s est la technologie MIDI, un outil qui est utilisé dans la majorité des études contenues dans cette revue (**Tableau 4.1**). Cette technologie permet d'encoder une multitude d'informations musicales tout au long d'une interprétation, comme la hauteur des notes jouées, l'instant où une note est appuyée et relâchée, et la vitesse avec laquelle une note est appuyée (Yelton, 2015). Ces informations sont enregistrées sous format MIDI et, à des fins d'analyse, peuvent être lues par un logiciel à cet effet ou converties en un autre format comme un tableur (Bresin & Battel, 2000; Johnson, 2000). Dès 1992, Wilson chante les louanges de cette technologie et prévoit que son utilisation fournira des informations précieuses sur la performance musicale, tant à un niveau technique qu'à un niveau artistique (Wilson, 1992). Depuis, plusieurs pianos numériques ont la capacité d'enregistrer des données MIDI (Engel et al., 1997; Repp, 1995a). Il existe également

Tableau 4.1. Outils techniques utilisés par les études retenues pour cette revue. Quelques études ont employé plus d'une approche.

Outil	Technologie MIDI	Systèmes électromécaniques	Systèmes acoustiques	Analyse du mouvement
Fréquence d'utilisation	68%	17%	17%	2%

des pianos acoustiques équipés d'une interface permettant d'extraire ces données, permettant ainsi de répliquer l'expérience de jouer sur un piano acoustique tout en enregistrant les informations MIDI de la performance (Palmer, 1996; Repp, 1997c). La prévalence de ces pianos et la facilité à extraire les données qualifiant une interprétation font de la technologie MIDI un choix pratique pour plusieurs chercheurs, ce qui peut expliquer son utilisation courante.

Il est aussi possible d'examiner plusieurs aspects de la performance pianistique à l'aide de systèmes électromécaniques (Hartmann, 1932; Sears, 1902; Seashore, 1938; Shaffer, 1980; Wagner, 1971) ou acoustiques (Bengtsson & Gabrielsson, 1980, 1983; Povel, 1977). Selon Mackenzie et Van Eerd (1990), ces approches possèdent chacune leurs avantages et désavantages. La mesure des caractéristiques acoustiques est plus près de la musique, mais le chevauchement des informations dans les enregistrements spectrographiques peut compliquer les analyses. La mesure des touches ou des marteaux, quant à elle, est plus près du résultat produit par le système moteur, mais ces caractéristiques ne sont pas toutes pertinentes, et la musique elle-même n'est pas mesurée. Enfin, certaines technologies récentes permettant de retracer le mouvement de pianistes offrent de nouvelles approches afin de mesurer la performance.

4.1.1. La technologie MIDI

Les cinq paramètres de la performance pianistique identifiés dans cette revue peuvent être évalués à l'aide de la technologie MIDI.

La présence d'erreurs. La hauteur d'une note jouée sur un instrument MIDI est enregistrée sous la forme d'un nombre allant de 0 à 127, où chaque nombre correspond à une certaine fréquence (les valeurs 22 à 108 représentant les 88 notes d'un piano). Il est ainsi possible de comparer les notes jouées lors d'une interprétation aux notes indiquées par la partition afin de déterminer la présence d'erreurs, soit en valeur absolue (Repp, 1996b) ou par un taux exprimant le ratio d'erreurs dans une certaine section (Drake & Palmer, 2000). Ces erreurs peuvent par la suite être divisées en plusieurs catégories. Lorsqu'il en vient aux erreurs de hauteur, Palmer et van de Sande, (1993) et Repp (1996b) catégorisent ces erreurs en tant que substitutions, omissions ou intrusions. Une substitution consiste à remplacer une note par une note différente, une omission est le fait de ne pas jouer une note qui se trouve dans la partition, et une intrusion est l'ajout involontaire d'une note. Lorsque les erreurs de rythme sont également prises en compte, certains autres catégories émergent — Drake et Palmer (2000) divisent les erreurs selon la nomenclature suivante :

- Erreurs de hauteur, où la hauteur d'une note jouée est incorrecte;
- Erreurs de durée, où la durée d'une note est incorrecte;
- Combinaison hauteur/durée, où ces deux caractéristiques sont erronées;
- Erreurs de correction, où le pianiste commet une série d'erreurs et, après une pause, recommence;
- Pauses, où le pianiste hésite pendant une certaine durée avant de poursuivre.

L'intensité. La technologie MIDI permet d'enregistrer la force avec laquelle une note est appuyée sous la forme d'une valeur arbitraire allant typiquement de 0 à 127 (Drake & Palmer, 1993; Keller et al., 2011; Repp, 1996c), quoique certains instruments plus précis renvoient des valeurs pouvant aller jusqu'à 1024 (Palmer, 1996). Puisque la force d'appui est directement

reliée à l'intensité du son de la note produite, cet outil permet de capturer avec précision l'intensité d'une performance (Finney, 1997).

L'articulation. Puisque la technologie MIDI permet d'enregistrer l'instant précis où une note est appuyée et relâchée à la milliseconde près, il est possible de calculer la durée entre l'appui d'une note et le relâchement de la note précédente. Cette durée, appelée *key overlap time* ou KOT par Repp (1995), est utilisée afin de quantifier l'articulation entre deux notes consécutives. Une valeur positive reflète un chevauchement des notes et ainsi une articulation *legato*, tandis qu'une valeur négative reflète un détachement des notes et une articulation détachée ou *staccato*. Certains chercheurs préféreront ne pas utiliser une valeur négative et référeront donc à la durée séparant ces deux notes en tant que *key detached time* ou KDT (Bresin, 2002).

L'utilisation de la pédale forte. L'utilisation de la pédale forte peut être tracée à l'aide des données MIDI capturant l'instant où la pédale est appuyée et relâchée. Certains instruments sont plus précis et permettent de capturer la position de la pédale (en 256 incréments) à chaque 10 millisecondes. Il est par la suite possible de simplement calculer la fréquence d'utilisation de la pédale lors d'une interprétation. Il est également possible d'étudier l'utilisation de la pédale en relation aux notes jouées, par exemple en quantifiant la durée entre l'appui d'une note et le relâchement de la pédale par après (et donc la durée pour laquelle la note fut « tenue » à l'aide de la pédale) (Repp, 1996a).

Le rythme. Comme mentionné précédemment, la technologie MIDI permet d'enregistrer l'instant précis où une note est appuyée et relâchée. L'IOI, ou *inter-onset interval*, définit la durée entre l'appui d'une note et l'appui de la note suivante (Bresin, 2002) et a fréquemment été utilisée afin d'évaluer le rythme et sa variabilité (Cheng et al., 2013; Jabusch et al., 2004; Repp,

1997d; Van Vugt & Altenmuller, 2019; Vaquero et al., 2016). Il est également possible d'utiliser les données MIDI afin de calculer le tempo d'une performance ou d'un passage (Repp, 1997b).

4.1.2. Systèmes électromécaniques

Bien que l'emploi de la technologie MIDI soit prévalent dans la recherche sur la performance pianistique, celle-ci n'est pas omniprésente. Certaines études dans cette revue datent d'avant l'avènement de la technologie MIDI et font donc plutôt l'emploi de systèmes électromécaniques. Les informations recueillies par ces systèmes sont très similaires à celles recueillies par la technologie MIDI, la différence majeure étant la manière dont ces informations sont extraites. Heinlein (1929), par exemple, utilise un kymographe, soit un appareil mécanique relié au système d'étouffoirs du piano permettant de retracer le mouvement de la pédale, afin d'évaluer l'utilisation de cette dernière. Shaffer (1980, 1981) et Clarke (1982, 1985) font l'emploi d'un piano équipé de photocellules qui enregistrent l'instant où une note est appuyée et relâchée, ainsi que le moment où le marteau de cette note frappe la corde correspondante à l'intérieur du piano. Ces photocellules reliées à un ordinateur envoient un signal sous la forme de lettres qui sont par la suite transformées en une valeur numérique représentant le moment où la note a été appuyée et relâchée à la milliseconde près. Il est ainsi possible de quantifier les IOIs, une mesure du rythme. La différence temporelle entre l'appui d'une note et le moment où le marteau entre en contact avec le marteau est aussi enregistrée, permettant ainsi de quantifier la vitesse de l'appui de la note, et donc son intensité. Ce genre de système a perdu en popularité depuis l'apparition de la technologie MIDI en raison de la praticité de cette dernière.

4.1.3. Systèmes acoustiques

Certaines études plus récentes, bien que la technologie MIDI soit disponible, utilisent néanmoins un autre outil afin d'évaluer la performance pianistique. Chaffin et collègues (2007) ainsi que Demos et collègues (2016) ont évalué le rythme en utilisant un logiciel permettant d'analyser les ondes sonores d'un enregistrement. Plutôt qu'utiliser les IOIs, les chercheurs ont évalué la durée entre les mesures (*inter-bar intervals* ou IBIs) et ont par la suite utilisé ces IBIs afin de déterminer le tempo de chaque mesure individuelle. Chaffin et collègues (2007) ont également évalué l'intensité en divisant le signal sonore en tranches de 10 millisecondes et calculant l'intensité sonore perçue pour chaque tranche en sones. Il est probable que ces chercheurs n'ont pas fait l'emploi de la technologie MIDI pour mesurer la performance pianistique puisque, dans le cadre de ces projets de recherche, ceux-ci ont également étudié des interprétations données par une violoncelliste. Les chercheurs ont également utilisé le tempo afin d'examiner la stabilité de chaque mesure (plus de détails sur cette procédure seront donnés dans la section 4.2.3), ce qui justifie l'emploi des IBIs plutôt que des IOIs.

L'emploi de systèmes acoustiques peut également être justifié si les performances analysées n'ont pas été enregistrées en laboratoire, et donc qu'il n'est pas possible d'analyser les données MIDI. Par exemple, Repp (1992, 1995b) étudie le rythme de divers enregistrements commerciaux du même morceau à des fins de comparaison.

4.1.4. Analyse du mouvement

Lipke-Perry et collègues (2019) ont quant à eux évalué le rythme et l'articulation à l'aide de capteurs de mouvements placés sur les doigts des participants. L'appui et le relâchement d'une note étaient déterminés en examinant les coordonnées y (c.-à-d. la hauteur) des doigts ;

lorsque cette position était sous la hauteur de la surface d'une note, alors cette dernière était considérée comme étant appuyée. Bien que les KOTs et les IOIs sont utilisés dans l'étude, les auteurs se réfèrent à ces valeurs en tant que *overlap time* et *movement time*, respectivement. Cette méthode d'analyse possède l'avantage de pouvoir capturer tant ces paramètres que le mouvement des doigts — et donc comment ces paramètres sont achevés — ce qui pourrait offrir de l'information inestimable dans le futur.

En somme, il existe plusieurs outils permettant d'évaluer la performance pianistique, le plus populaire étant de loin la technologie MIDI en raison de sa précision et sa disponibilité. Certains outils ont cependant l'avantage de pouvoir effectuer des comparaisons entre différents instruments (Chaffin et al., 2007; Demos et al., 2016) ou de capturer à la fois certains paramètres et les mouvements employés afin d'achever ces paramètres (Lipke-Perry et al., 2019).

4.2. Méthodes d'analyse de la variabilité

Il existe plusieurs méthodes dans le domaine de la biomécanique afin de mesurer la variabilité de paramètres. Ces dernières sont typiquement divisées en deux catégories selon le type de variable étudié, soit des statistiques descriptives et des mesures continues. Les prochaines sections réviseront ces mesures et comment elles ont été appliquées dans le domaine de la performance pianistique.

4.2.1. Statistiques descriptives

Selon Stergiou (2004, pp. 46-49), il existe au moins cinq statistiques descriptives fréquemment utilisées afin de quantifier la variabilité de variables discrètes sur plusieurs essais, soit l'étendue, la variance, l'écart type, le coefficient de variation (CV) et l'écart interquartile (*interquartile range* ou IQR), l'écart type et le CV étant les plus courants en biomécanique et les

autres sciences du mouvement. Un désavantage de ces mesures est que ces dernières, à l'exception de l'IQR, présument que les données sont distribuées normalement et sont substantiellement affectées par les valeurs aberrantes. Ainsi, certains chercheurs recommandent de faire usage de mesures non paramétriques comme l'IQR et l'écart médian absolu (*median absolute deviation* ou MAD) (Chau et al., 2005; Chau & Parker, 2004; Preatoni et al., 2013). Le CV est également particulièrement utile afin de comparer la variabilité de deux performances dont les valeurs moyennes diffèrent largement. 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.

Certains paramètres de la performance pianistique prennent la forme de variables discrètes. Entre autres, la présence d'erreurs et l'utilisation de la pédale peuvent toutes deux être quantifiées sous forme de variable discrète 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 variabilité de ces paramètres à l'aide des statistiques descriptives mentionnées. Palmer et van de Sande (1993) ainsi que Drake et Palmer (2000) ont performé une analyse de variance sur le taux d'erreur de différents groupes de pianistes à des fins de comparaison. Ces erreurs ont toutefois été observées dans l'interprétation de morceaux peu préparés ; il existe donc peu d'information quant à la variabilité de la présence d'erreurs dans le cadre de morceaux bien préparés. Cette notion est toutefois un peu paradoxale puisque la présence d'erreur dans un morceau bien préparé devrait être minime, voire inexistante, et donc l'étude de sa variabilité n'est peut-être pas possible.

Dans la même veine, la variabilité de la présence d'erreurs dans l'exécution d'exercices techniques n'a pas été étudiée, bien que plusieurs études mentionnent avoir remarqué une telle

variabilité (Jabusch et al., 2004; Van Vugt et al., 2012; Van Vugt, Jabusch, et al., 2013; Van Vugt, Treutler, et al., 2013). L'exclusion des essais contenant des erreurs peut être justifiée lors de la conduite d'analyse sur d'autres aspects de la performance. Dans le domaine de la biomécanique, il est également recommandé d'identifier et d'éliminer les occurrences atypiques (Chau et al., 2005; Preatoni et al., 2013). La quantification de la variabilité de la présence d'erreurs dans ce contexte à l'aide des statistiques descriptives mentionnées plus haut pourrait cependant fournir de l'information intéressante.

L'emploi de statistiques descriptives afin de mesurer la variabilité de l'utilisation de la pédale forte se limite à Heinlein (1929) et Repp (1996) qui ont tous deux employé l'étendue afin de quantifier cette variabilité. Ces analyses ont toutefois été conduites sur de petits échantillons (quatre et deux pianistes, respectivement). Évaluer la variabilité 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 variabilité de ce paramètre à des fins de comparaison.

L'intensité, l'articulation et le rythme peuvent également prendre la forme de variables discrètes, par exemple en calculant la durée totale d'une interprétation, ou l'intensité moyenne d'une performance. Cependant, l'évaluation de ces valeurs discrètes est très peu fréquente puisque l'étude des profils créés par la variation de ces paramètres au cours d'une performance (c.-à-d. des mesures continues) révèle plus d'informations pertinentes. La variabilité de ces paramètres sur plusieurs essais sera donc abordée dans la section suivante.

Il existe cependant un contexte spécifique où l'emploi de statistiques descriptives sur ces paramètres est pertinent, soit la variabilité à l'intérieur d'un seul essai (c.-à-d. la régularité). Par exemple, Salmon et Newark (1989) utilisent l'écart type afin de quantifier la variabilité de l'intensité, de l'articulation et de la durée des notes durant l'énoncé initial d'un sujet de fugue. Cette variabilité 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 variabilité 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 & Ericsson, 1996b). 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/seconde et diminue plus le tempo s'éloigne de cette portée. Ce résultat sera corroboré par Mackenzie et Van Eerd (1990) à l'aide de l'écart type et du coefficient de variation.

L'analyse de gamme telle que développée par Jabusch et collègues (2004) fait également usage de la régularité. Pour chaque gamme, l'écart type des IOIs est d'abord calculé, puis la moyenne ou la médiane de ces écarts types est calculée pour chaque condition (p. ex. la main qui joue la gamme ou la direction), ce qui donne des valeurs intitulées msdIOI. Il est ensuite possible de calculer la médiane de ces valeurs afin d'obtenir une seule mesure qualifiant la régularité rythmique d'un participant (Jabusch et al., 2007, 2009), un score intitulé MIOI par les auteurs. Ce processus permet ainsi de quantifier l'irrégularité rythmique et d'effectuer des comparaisons entre différents groupes de participants ou conditions, ou calculer la corrélation entre ces scores

d'irrégularité à différents moments (Jabusch et al., 2009). Il est également possible d'utiliser le coefficient de variation afin de quantifier la régularité (Cheng et al., 2013).

Bref, les cinq paramètres de la performance pianistique trouvés dans cette revue peuvent prendre la forme de variables discrètes et ainsi leur variabilité peut être étudiée à l'aide des statistiques descriptives mentionnées au début de cette section. Cette revue démontre que peu d'information existe quant à la variabilité de la présence d'erreurs et de l'utilisation de la pédale forte. De plus, bien que dans le domaine de la biomécanique il est recommandé de faire usage de mesures non paramétriques (p. ex. IQR ou MAD), l'emploi de statistiques descriptives dans le domaine de la performance pianistique s'est surtout limité à l'étendue, l'écart type et le CV.

4.2.2. Mesures continues

Graphiques de séries temporelles. Bien que les statistiques descriptives ont leurs utilités, il est bien établi dans le domaine de la biomécanique que leur emploi peut ne pas être suffisant afin de fournir une description exhaustive des mouvements étudiés (Queen et al., 2006; Ryan et al., 2006; Sutherland et al., 1996). En effet, lorsqu'un mouvement est répété par un individu, ce dernier ne produit pas des motifs cinétiques et cinématiques qui se chevauchent parfaitement, mais plutôt une famille de courbes qui diffèrent en amplitude ou en synchronisation temporelle (Preatoni et al., 2013). L'étude de ces courbes peut fournir de l'information précieuse quant à la manière dont une tâche motrice est accomplie. Une manière de représenter la variabilité de ces courbes est de simplement superposer ces courbes sur le même graphique (intitulés graphiques de séries temporelles, *time-series graphs*) (Stergiou, 2004). Cependant, il est plus pertinent d'illustrer une courbe de la variabilité 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 et collègues (2012) ont fait l'emploi d'un tel processus afin d'enquêter la variabilité de la performance de gammes (**Figure 4.1**). Contrairement à l'analyse de gamme employée par Jabusch et collègues (2004) qui utilise l'écart type des IOIs afin de mesurer la déviation rythmique, Van Vugt et collègues ont plutôt comparé les gammes recueillies à une gamme jouée avec une régularité parfaite (c.-à-d. qui conserve exactement le même rythme tout au long de l'exécution). Un désavantage de l'étude des IOIs est que la déviation rythmique d'une seule note affecte deux intervalles (c.-à-d. l'IOI avec la note précédente et avec la note suivante). La méthode d'analyse employée par Van Vugt et collègues corrige ce problème en comparant l'instant où chaque note individuelle est jouée à l'instant où elle serait jouée dans une gamme exécutée parfaitement, permettant ainsi de quantifier la déviation rythmique de chaque note individuelle plutôt que les intervalles entre les notes.

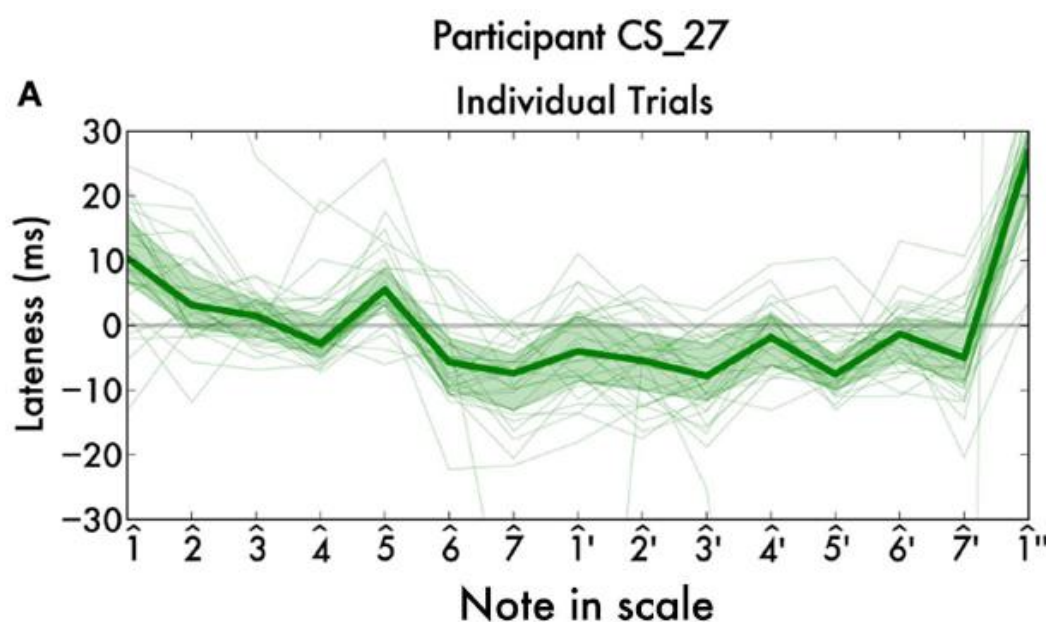


Figure 4.1. Déviations rythmiques selon la position de la note dans une gamme. Les lignes fines représentent chaque essai individuel. La ligne en gras dépeint la médiane de ces essais et la zone ombrée indique l'écart interquartile (Van Vugt et al., 2012).

Cette technique a permis aux auteurs de diviser les déviations rythmiques en deux catégories, soit l'irrégularité rythmique et l'instabilité rythmique. L'irrégularité rythmique représente les notes qui sont constamment jouées en retard ou en avance lors de chaque gamme. L'instabilité rythmique représente quant à elle les notes présentant une déviation rythmique qui varie largement de gamme en gamme. Ces données suggèrent donc que bien qu'une gamme de plusieurs octaves est jouée en tant qu'une seule phrase musicale, la gamme est divisée en séquences motrices de la longueur d'une octave, avec une instabilité plus importante lors de la transition entre ces séquences (Van Vugt et al., 2012).

Une étude subséquente de Van Vugt et collègues (2014) utilise la même technique afin de proposer un modèle à deux facteurs visant à élucider les déviations rythmiques omniprésentes dans la performance de gammes et comment ces déviations changent en fonction du tempo. À quelques occasions lors de la performance d'une gamme, la main doit effectuer un mouvement plus complexe, par exemple lorsque le pouce doit passer en dessous des autres doigts afin d'atteindre la prochaine note dans le cadre d'une gamme ascendante jouée avec la main droite. Plusieurs études ont rapporté des déviations rythmiques plus prononcées lors de ces manœuvres (Lipke-Perry et al., 2019; MacKenzie & Van Eerd, 1990; Van Vugt et al., 2014). Dans le cadre de leur modèle, Van Vugt et collègues avancent que ces contraintes biomécaniques expliquent une proportion des déviations observées, et que cette proportion devient plus importante plus le tempo de la performance augmente. Ce facteur est donc intitulé le facteur neuromusculaire.

En contrepartie, le facteur de phrase (*phrasal*) explique une plus grande proportion des déviations observées aux tempi plus lents, et cette proportion diminue plus le tempo augmente. Les déviations expliquées par le facteur de phrase consistent en une performance plus lente au début des gammes, et un ralentissement plus prononcé en fin de gamme. Cette tendance à ralentir

à la fin d'un stimulus musical (fréquemment appelée *final ritard*) est très répandue dans la littérature, particulièrement dans le cadre de morceaux (Honing, 2003; Palmer & Krumhansl, 1987; Repp, 1998), mais a également été observée dans la performance de gammes (Van Vugt et al., 2012). Les auteurs avancent donc l'hypothèse que les déviations expliquées par le facteur de phrase sont des résidus de l'expressivité, où puisque les ressources cognitives des pianistes sont moins préoccupées par les difficultés entraînées par les contraintes biomécaniques, ces ressources sont plutôt dédiées à la création d'un son esthétiquement plaisant (Van Vugt et al., 2014).

Répétabilité. Un autre processus permettant de comparer la variabilité 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. Une méthode qui peut être observée dans le domaine de la performance pianistique afin de comparer les variables continues de plusieurs performances est plutôt le coefficient de corrélation Pearson. Une raison possible pouvant expliquer ce phénomène est que ces études n'avaient pas pour objectif principal d'étudier la variabilité des performances, mais voulaient simplement établir que les performances étaient assez similaires pour justifier la conduite d'analyses sur une ou plusieurs d'entre elles (Krampe & Ericsson, 1996b). Il demeure également que l'emploi du CMC et de l'ICC ne possède pas encore de lignes directrices standardisées dans le domaine de la biomécanique sportive (Preatoni et al., 2013).

4.2.3. Nouvelles approches

Le potentiel de certaines autres mesures préexistantes afin de mesurer la variabilité du mouvement fait présentement l'objet d'une enquête (Preatoni et al., 2013). Ces mesures incluent des mesures d'entropie (Preatoni, Ferrario, et al., 2010; Stergiou, 2004) et l'analyse en composantes principales (*Principal Component Analysis*, PCA) (Deluzio et al., 1999; Deluzio & Astephen, 2007; Ramsay & Dalzell, 1991). Cette revue a identifié une étude qui a fait l'emploi de la mesure d'entropie de Shannon (1948) afin de quantifier la variabilité. Keller et collègues (2011) ont comparé la variabilité de l'intensité à l'intérieur 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 est qu'elle n'offre pas d'information quant à la fonction de cette variabilité (Preatoni et al., 2013).

Certains auteurs examinent la stabilité de plusieurs performances en comparant les déviations entre la performance enregistrée et une performance attendue (Van Vugt et al., 2012), ou la performance moyenne (Repp, 1997d). Demos et collègues (2016) comparent plutôt chaque performance à toutes les autres performances directement. Cette méthodologie se distance de la présomption que la performance est le produit de programmes moteurs sous-jacents auxquels du « bruit » est ajouté durant l'exécution (Van Vugt et al., 2012) en faveur de l'interprétation que chaque performance est un événement unique. Les auteurs justifient l'emploi de cette méthodologie puisque le but de l'étude était d'enquêter l'existence d'une variabilité intentionnelle manipulée par les interprètes dans le but de donner à leurs interprétations une apparence spontanée. En comparant le rythme de chaque mesure individuelle à leurs répétitions

dans les autres performances, les auteurs ont pu 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 (p. ex au niveau de chaque mesure et 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 et collègues (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 4.2**).

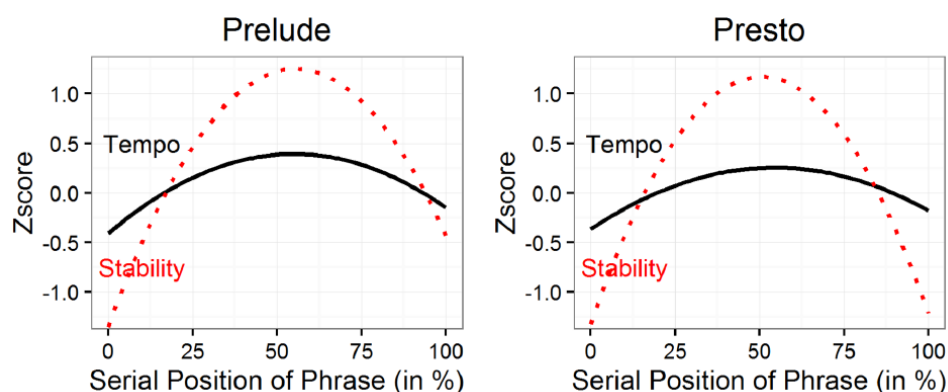


Figure 4.2. Tempo et stabilité du rythme (normalisés en scores Z) en fonction de la position sérielle dans une phrase musicale pour douze performances du Prélude de la Suite n°6 pour violoncelle de J.S. Bach (gauche) et huit performances du Presto du Concerto italien de J.S. Bach (droite) (Demos et al., 2016).

4.2.4. *Lacunes en lien aux méthodes d'analyse de la variabilité*

Il existe certaines lacunes dans notre compréhension actuelle de la variabilité de la performance pianistique qui peuvent être retracées aux méthodes employées afin de mesurer la variabilité. Un aspect sous-étudié de la variabilité de la performance pianistique est la variabilité du mouvement des pianistes. La variabilité du mouvement est bien évidemment un élément crucial de la biomécanique, et cette dernière peut être étudiée à l'aide des mesures présentées

précédemment, mais aussi à l'aide de diagrammes angle-à-angle (*angle-angle plots*, voir **Figure 4.3a**), Les diagrammes angle-à-angle sont des graphiques représentant la relation entre deux variables angulaires (Payton & Bartlett, 2007; Stergiou, 2004). Plusieurs techniques peuvent ensuite être employées sur ces données afin de quantifier leur variabilité. Le coefficient de correspondance (r , voir **Figure 4.3b**), calculée à l'aide d'une technique intitulée codage vectoriel (*vector coding*) (Tepavac & Field-Fote, 2001), quantifie la variabilité de la relation entre les deux variables tout au long du mouvement à l'aide d'une valeur allant de 0 (variabilité maximale) à 1 (aucune variabilité) (Payton & Bartlett, 2007). Il est également possible de faire usage de corrélations croisées (*cross-correlations*) afin d'évaluer la stabilité de la coordination entre deux variables (p. ex. une paire de joints), ce qui est particulièrement utile dans l'étude du mouvement (Mullineaux et al., 2001). Le coefficient de coordination et les corrélations croisées présente la variabilité à chaque instant durant l'exécution d'un mouvement ; il est toutefois également possible de calculer une moyenne de ces mesures afin d'obtenir une seule valeur globale de la variabilité en utilisant la racine de l'erreur quadratique moyenne normalisée (*normalised root mean square error*, ou NoRMS) (Mullineaux et al., 2001; Payton & Bartlett, 2007; Sidaway, 1995).

Dans le domaine de la performance pianistique, ces méthodes d'analyse de la variabilité ne semblent pas être employées. Cela peut être expliqué par le fait que la recherche sur la variabilité de la performance pianistique s'est surtout concentrée sur des paramètres globaux, soit des paramètres définissant le produit final du mouvement, et non des paramètres techniques (cinétiques et cinématiques) qui définissent le mouvement et donc se portent bien à l'emploi de ces mesures. Cette revue n'a pas identifié d'étude ayant directement examiné la variabilité des mouvements impliqués dans la production d'une interprétation pianistique. L'absence d'enquête

sur la variabilité de mouvements pourrait être expliquée par le point de vue que l'étude de paramètres globaux est suffisante. Wilson (1992) 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. (p. 81).

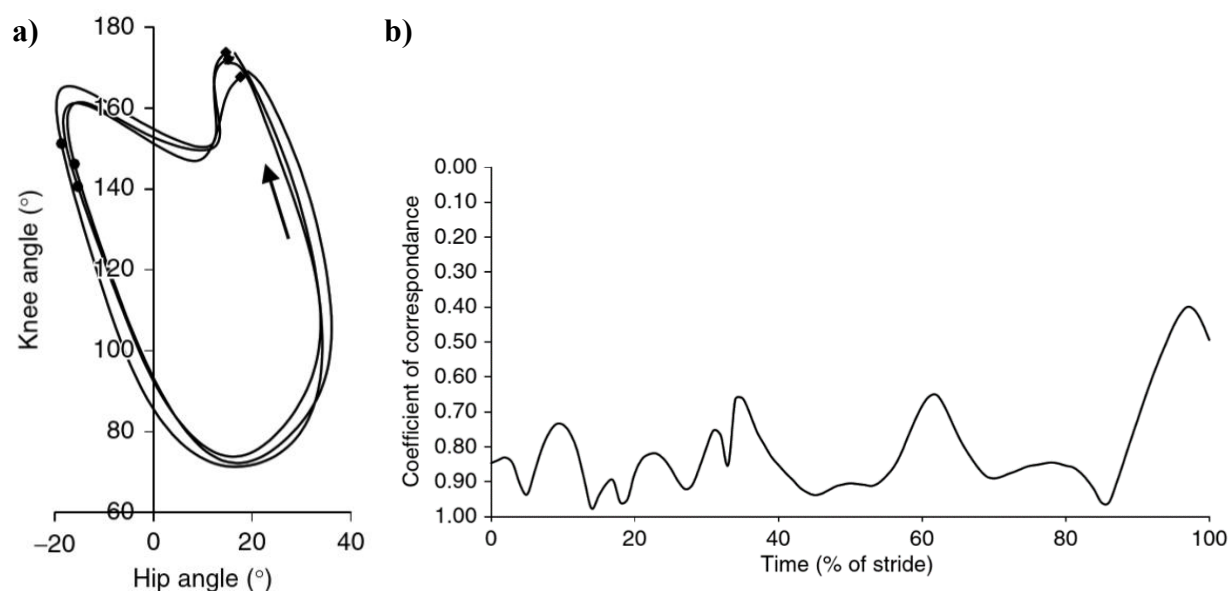


Figure 4.3. (a) Diagramme angle-à-angle du genou et de la hanche pour trois essais de course à pied par un seul participant (b) Diagramme du coefficient de correspondance calculée à l'aide du codage vectoriel pour ces trois mêmes essais (Payton & Bartlett, 2007).

Cependant, il est bien établi en biomécanique qu'une faible variabilité du résultat final ne reflète pas nécessairement une faible variabilité de la manière dont ce résultat a été achevé (Messier & Kalaska, 1999; Preatoni, 2007) et, de surcroît, certains auteurs sont arrivés à la

conclusion que 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).

Cela soulève la question : ce phénomène a-t-il déjà été observé dans le cadre de la performance pianistique? La réponse est oui. Furuya et Kinoshita (2008a, 2008b) ont demandé à des pianistes experts et novices de jouer deux notes séparées par une octave à l'aide du pouce et de l'auriculaire. Ces octaves ont été jouées à trente reprises à quatre différents niveaux d'intensité préétablis. L'analyse révèle que les experts, grâce à une combinaison plus synergique de leurs articulations et de leurs membres, effectuaient un mouvement minimisant la charge biomécanique, ainsi que l'effort musculaire. Une autre conclusion particulièrement intéressante est que la force avec laquelle les notes étaient jouées variait moins chez les experts que chez les novices. Ainsi, bien que les novices et les experts produisaient le même résultat final (une octave à une certaine intensité), l'étude de leurs mouvements a dévoilé certaines différences entraînées par l'expertise.

Il serait peut-être alors plus judicieux, dans le cadre de la recherche portant sur la variabilité de la performance pianistique, d'examiner la variabilité des mouvements de pianistes en conjonction à la variabilité de paramètres globaux tels que ceux identifiés dans cette revue. De tels protocoles pourraient révéler de l'information pertinente quant aux habiletés motrices de pianistes et la manière dont ces derniers arrivent à répliquer une performance musicale. 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. Une méthodologie semblable à celle employée par Lipke-Perry et collègues (2019), où les paramètres globaux étaient

déterminés à l'aide de capteurs placés sur les doigts des pianistes, pourrait permettre d'élucider cet enjeu.

En somme, l'étude de la variabilité de variables continues dans le cadre de la performance pianistique s'est surtout limitée aux paramètres globaux. De ce fait, l'application des méthodes d'analyse de la variabilité employées en biomécanique sur les mouvements de pianistes pourrait offrir de nouvelles perspectives sur la performance musicale. Il pourrait également être informatif de conduire plus d'études faisant emploi de nouvelles mesures de la variabilité telles que l'entropie (Keller et al., 2011) et la mesure de la stabilité développée par Demos et collègues (2016).

4.3. Le rôle de l'expertise

La relation entre l'expertise et la variabilité a été étudiée dans une multitude de disciplines sportives, où plusieurs d'entre elles ont remarqué une diminution de la variabilité plus le niveau d'expertise était élevé (Chapman et al., 2009; Fleisig et al., 2009; Glazier & Davids, 2009; Hiley et al., 2013; Shmuelof et al., 2012), alors que d'autres ont plutôt observé une augmentation (Arutyunyan et al., 1968; Schöllhorn & Bauer, 1998). Dans le domaine de la performance pianistique, les études conduites jusqu'à présent semblent indiquer que la variabilité 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.

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

Salmon et Newark (1989) ont examiné la régularité de l'intensité, de l'articulation et du rythme chez trois pianistes possédant différents niveaux d'expertise, où le premier avait le moins d'expérience et le troisième, le plus. L'analyse des auteurs se concentre surtout sur la

performance du thème principal, un motif de huit notes qui devraient être idéalement jouées avec une régularité importante. Plusieurs phénomènes sont soulignés par les auteurs. D'abord, la variabilité de l'intensité du troisième pianiste est moins prononcée que ses deux compères, ce qui est démontré par un écart type moins élevé (**Figure 4.**). En particulier, la différence entre la première note et la seconde est beaucoup moins importante que chez les deux premiers pianistes. Pour ce qui a trait à l'articulation, le premier pianiste démontre le plus de variabilité, alors que l'articulation des deux autres pianistes est notamment plus régulière. Quant au rythme, les auteurs font note de la stabilité remarquable du troisième pianiste : la valeur moyenne de chaque note dans chaque répétition du thème ne variait pas plus que 0,1 seconde.

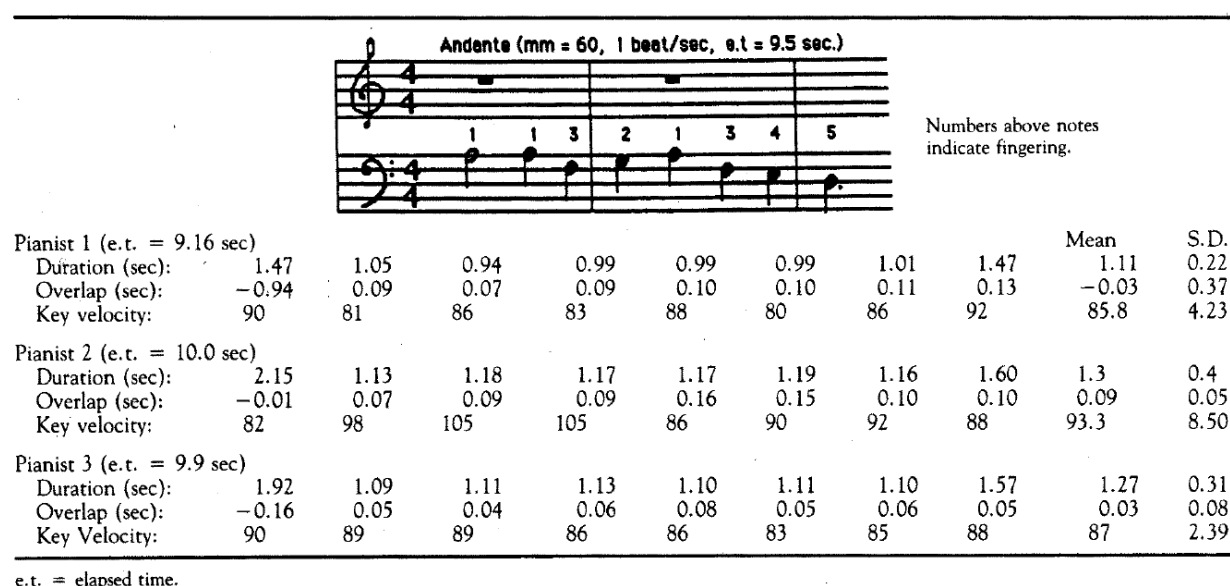


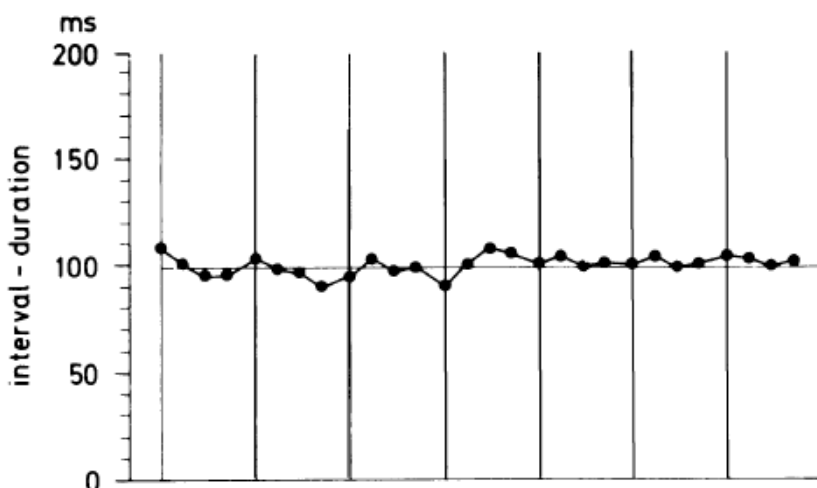
Figure 4.4 Durée, chevauchement et vélocité (en unités MIDI) pour chaque note du thème chez chacun des trois pianistes. (Salmon & Newmark, 1989).

Ericsson et collègues (1993) ainsi que Krampe et Ericsson (1996a) ont examiné la variabilité 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 et collègues (1993) ont trouvé un coefficient de corrélation moyen de $r = 0,866$ entre les trois performances des experts, tandis que

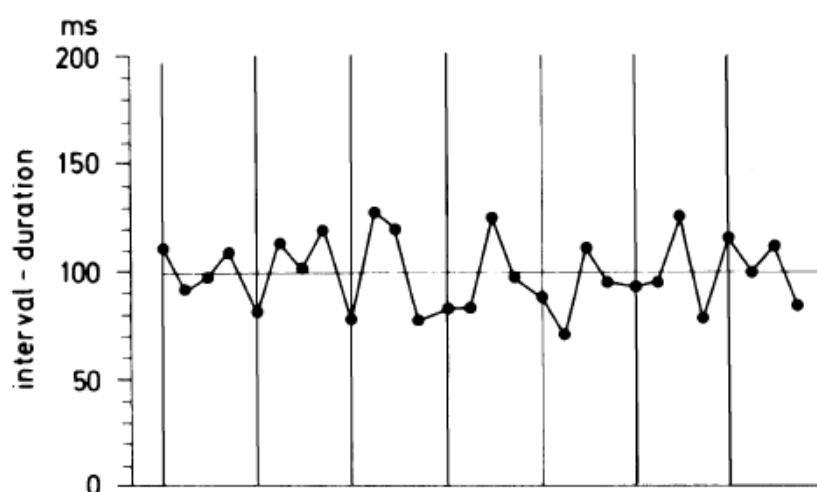
chez les amateurs, ce coefficient était de $r = 0,695$. Le même phénomène est observé par Krampe et Ericsson (1996) : une analyse de variance révèle que l'intensité des experts était plus stable que celle des amateurs. Une autre analyse de variance provenant de cette étude démontre également que le taux d'erreurs des experts était significativement moins élevé, ce qui suggère que la variabilité de la présence d'erreur diminue aussi avec l'expertise. Quant au rythme, Repp compare les huit premières mesures de *Träumerei* 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 variabilité 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 donc il est possible que les pianistes aient délibérément altéré leurs interprétations de ces répétitions à des fins artistiques.

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

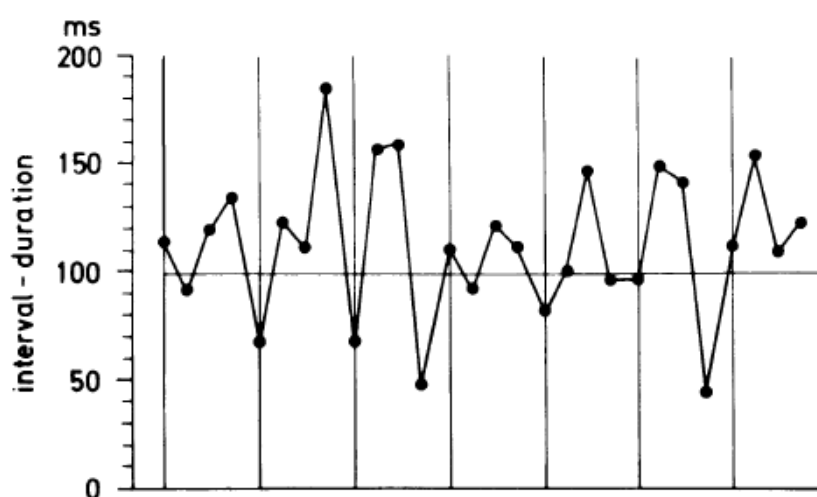
L'étude de la relation entre l'expertise et la variabilité dans l'exécution d'exercices techniques s'est surtout concentrée sur la régularité. Wagner et collègues (1973) ont examiné la régularité rythmique dans la performance de gammes de do majeur chez trois pianistes possédant différents niveaux d'expertise. Leur analyse révèle une diminution considérable de la variabilité plus le niveau d'expertise du pianiste était élevé (**Figure 4.5**). Ce phénomène sera corroboré à plusieurs occasions par après. Dans une étude chez des enfants âgés de 8 à 17 ans, Jabusch et collègues (2007) trouvent une corrélation entre la régularité rythmique 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) compare la régularité rythmique lors de deux séances séparées par une durée



Pianist
Age 23, 14 years tuition



Intermediate
Age 18, 6 years tuition



Beginner
Age 21, 1.5 years tuition

Figure 4.5. Durée des intervalles entre chaque note d'une gamme de do majeur, deux octaves, en mouvement ascendant et descendant (Wagner et al., 1973).

moyenne de 27 mois. Une corrélation fut trouvée entre la régularité rythmique lors de la première séance et le temps de répétition total accumulé à ce moment ($r = -0.47$). Lorsque la différence entre la régularité rythmique des deux séances fut analysée, une corrélation fut 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 le plus de diminution de la variabilité lors de la seconde séance.

Jabusch et collègues (2009) notent que, lorsque comparé aux enfants étudiés dans leur étude précédente (Jabusch et al., 2007), la variabilité 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. Vaquero et collègues (2016) comparent la régularité rythmique de deux groupes de pianistes, un groupe ayant débuté leurs leçons avant l'âge de 7 ans, et l'autre, après l'âge de 7 ans. Une analyse de variance sur les valeurs msdIOI des deux groupes révèle une différence significative de la régularité, où le premier groupe démontrait une meilleure régularité (msdIOI moyen = $10,35 \pm 2,19$ ms) que le second groupe (msdIOI moyen = $12,69 \pm 3,60$ ms). Ces résultats suggèrent que l'influence de l'expertise sur la variabilité dépend non seulement du temps de répétition, mais également de l'âge de début des leçons.

4.3.3. Lacunes concernant le rôle de l'expertise

Les informations recueillies jusqu'à présent pointent vers la conclusion que la variabilité de la performance pianistique diminue plus le niveau d'expertise est élevé. Cependant, plusieurs aspects de cette relation demeurent à être élucidés davantage. Notamment, la majorité des informations que nous possédons actuellement proviennent d'études sur le rythme et l'intensité. Dans le cadre de l'exécution d'exercices technique, seule la régularité du rythme a été étudiée.

L'influence de l'expertise sur les autres paramètres de la performance pianistique, ainsi que sur la stabilité de la performance de gammes, est donc toujours énigmatique. De plus, puisque la variabilité des mouvements des pianistes est, à ce jour, sous-étudiée, sa relation avec l'expertise est tout autant incertaine. Une compréhension plus complète de la relation entre la variabilité et l'expertise peut contribuer à la recherche dans le futur, par exemple en informant les chercheurs sur le montant de variabilité attendu en fonction de l'expertise de la population à l'étude.

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

Un pilier important de la recherche en biomécanique sportive est l'importance de développer des protocoles avec plusieurs essais afin d'obtenir une évaluation fiable d'un ou plusieurs paramètres (Bates et al., 1992; Chau et al., 2005; Preatoni et al., 2013). Pour ce faire, des études sont conduites afin de déterminer ce nombre d'essais minimal (Bates et al., 1983; DeVita & Bates, 1988; Hamill & McNiven, 1990; Preatoni, 2007; Rodano & Squadrone, 2002). Bien qu'une multitude d'études dans le domaine de la performance pianistique font 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 dans la littérature.

4.4.1. 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 4.2**), et un thème principal qui ressort de cette revue est la stabilité considérable de la performance

Tableau 4.2. Nombre de répétitions employées par les études retenues pour cette revue.

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

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* 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 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 d'une sonate de Mozart, Palmer (1996) remarque que son équivalent pour l'intensité n'atteint que $r = 0,81$. Ericsson et collègues (1993) trouvent quant à eux un coefficient de corrélation moyen de $r = 0,866$ entre trois interprétations du Prélude en do majeur 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 entraîne le risque d'évaluer un essai qui n'est pas représentatif de la performance habituelle d'un participant, ce qui pourrait mener à des conclusions erronées (Bates et al., 1992). Ce risque paraît plus évident lorsque l'on constate l'absence d'information quant à la variabilité des paramètres de la performance pianistique autre que le rythme et l'intensité. En particulier, la variabilité 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 qu'utiliser la moyenne de plusieurs essais diminue le risque de conduire des analyses sur une performance atypique. Il n'est toutefois pas présentement possible de conclure quel nombre d'essais est approprié, particulièrement pour les études examinant la performance d'amateurs. En biomécanique clinique, Mullineaux et collègues (2001) recommandent l'emploi 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.

Il est toutefois nécessaire de souligner que le nombre d'essais minimal pourrait être significativement plus élevé chez les amateurs. Comme souligné dans les paragraphes précédents, les amateurs démontrent une variabilité 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 réglé par 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 amateur.

4.4.2. 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 (**Tableau 4.3**), quoique certaines études récentes ont plutôt conduit leurs analyses sur des séquences d'environ 30 gammes (Van Vugt et al., 2012; Van Vugt & Altenmuller, 2019; Vaquero et al., 2016). Parmi toutes ces études, seulement quelques-unes ont examiné la stabilité de la performance d'exercices techniques. Dans l'étude de Jabusch et collègues (2009) examinant la régularité rythmique lors de deux séances séparées par une durée moyenne de 27 mois, les auteurs trouvent une corrélation de $r = 0,82$ entre les scores MIOI de la première et de la seconde séance (**Figure 4.6**). Il est important de noter que cette corrélation ne signifie pas que la performance de gammes entre les deux séances était pratiquement identique, mais plutôt qu'il existe une relation entre les scores MIOI des deux séances. Néanmoins, ces données indiquent une stabilité considérable de la régularité rythmique.

Van Vugt et collègues (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

Tableau 4.3. Nombre de répétitions employées par les études retenues pour cette revue.

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

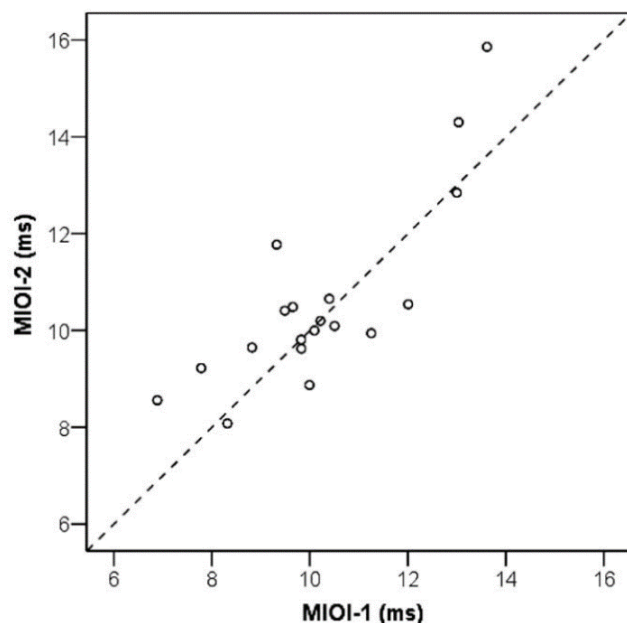


Figure 4.6. Régularité rythmique quantifiée à l'aide de scores MIOI lors d'une première séance (MIOI-1) et d'une seconde séance après une durée moyenne d'environ 27 mois (MIOI-2). Chaque cercle représente un participant. Les cercles sous la ligne pointillée indiquent une diminution de la régularité rythmique lors de la seconde séance, alors que les cercles au-dessus de la ligne pointillée indiquent une augmentation de la régularité rythmique (Jabusch et al., 2009).

sont plus semblables entre deux performances d'un même pianiste qu'entre deux performances de pianistes différents (**Figure 4.7**). 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 significativement plus similaires que les profils de différents pianistes. Ces données démontrent qu'il existe une stabilité particulièrement impressionnante lors de la performance de gamme, 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.

Les enjeux liés à la stabilité de la performance de gamme sont les mêmes que pour la performance de morceaux. Bien que ces données semblent indiquer que, chez les pianistes avancés, l'exécution d'exercices techniques est particulièrement stable, la collecte d'un seul essai

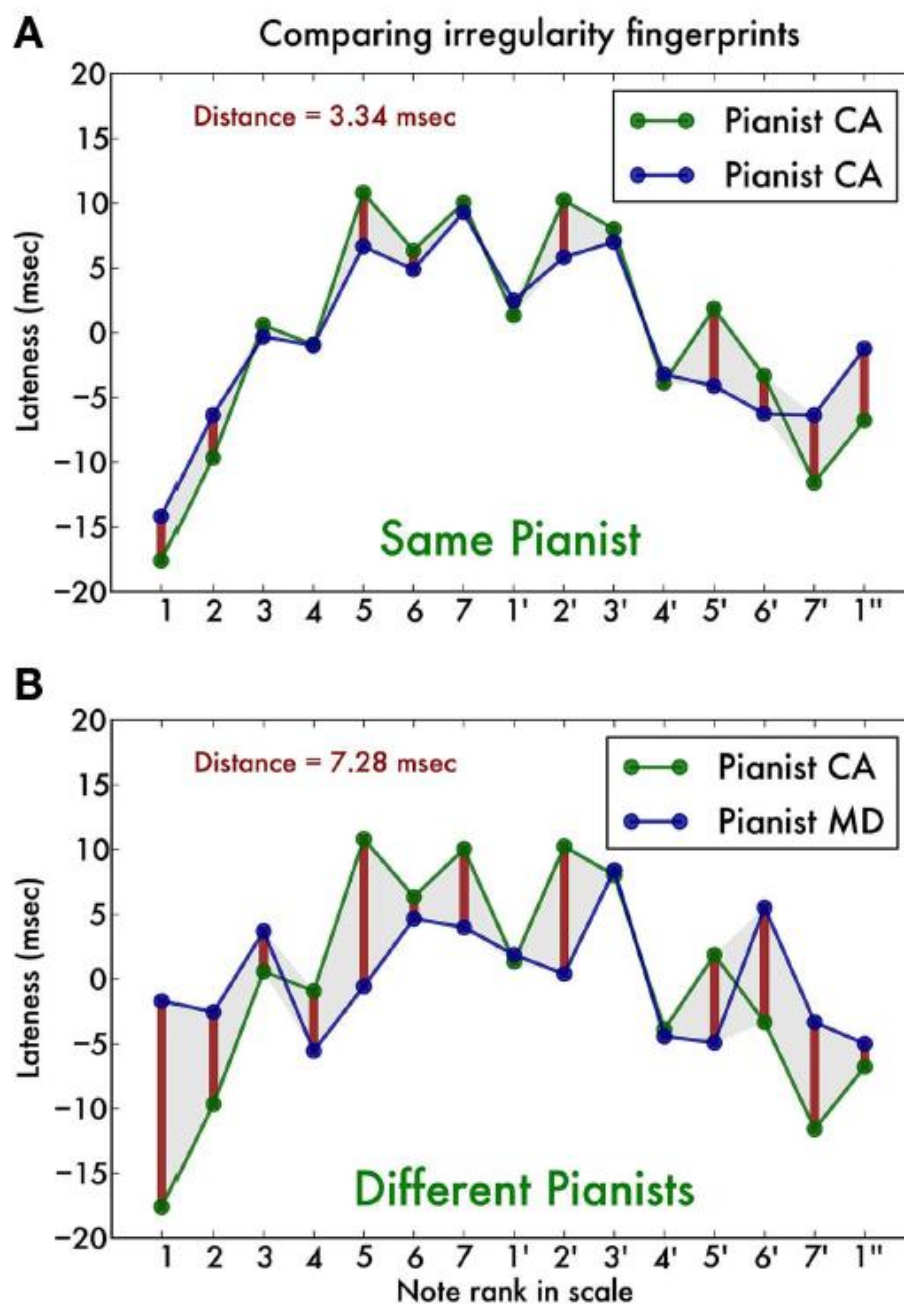


Figure 4.7. Comparaison des profils de déviations rythmiques moyens entre (A) deux séances du même pianiste et (B) deux séances de pianistes différents. Les lignes verticales rouges et les zones ombrées indiquent la distance temporelle entre les profils (Van Vugt, Jabusch, et al., 2013).

entraîne toujours le risque d'évaluer une performance non représentative d'un participant (Bates et al., 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 et collègues (2001) d'utiliser un protocole avec au moins trois essais soit suffisant. 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 fait la majorité des études retenues par cette revue. Les chercheurs voulant, par précaution, employer une approche plus conservative 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.

4.4.3. Lacunes concernant le nombre d'essais minimal

Comme mentionné à plusieurs reprises, cette revue n'a pas identifié d'études dont le but était de déterminer le nombre d'essais minimal afin d'obtenir une évaluation stable de paramètres de la performance pianistique. Plusieurs auteurs dans le domaine de la biomécanique soulignent l'importance de ce genre d'études (Bates et al., 1992; Chau et al., 2005; Preatoni, La Torre, et al., 2010). Particulièrement, il est important de déterminer le nombre d'essais minimal en fonction de l'activité, de la population, et de la variable à l'étude (Preatoni et al., 2013). Ces distinctions sont tout aussi importantes dans le domaine de la performance pianistique : il est présentement bien établi que le contexte de la performance (morceaux ou exercices techniques) ainsi que le niveau d'expertise des participants ont tous deux un impact sur la variabilité de la

performance. Par conséquent, il est fort probable que ces facteurs auront un impact sur le nombre d'essais approprié.

Bien que cette thèse a offert quelques recommandations quant aux nombres d'essais minimaux, il est impératif de conduire une enquête sur le nombre d'essais minimal pour obtenir une évaluation fiable des paramètres étudiés jusqu'à maintenant ainsi que les mouvements des pianistes, et ce en fonction du contexte de la performance et de l'expertise des participants. L'emploi de la procédure d'estimation séquentielle (Hamill & McNiven, 1990) afin de créer une base de données répertoriant ces informations pourrait être une contribution inestimable et guider la recherche dans le futur.

4.5. Les défis propres à la performance pianistique

Bien qu'il existe plusieurs parallèles entre le domaine de la biomécanique sportive et le champ de la performance musicale, il demeure que certaines difficultés spécifiques à la performance pianistique se manifestent lors de son étude, particulièrement en raison de la variabilité de la performance.

4.5.1. La sélection de stimuli

Contrairement à diverses disciplines sportives où plusieurs années sont dédiées au perfectionnement de certains mouvements spécifiques et tous les participants ont le même but (p. ex. le lancer du javelot), le répertoire des pianistes est de nature protéiforme. De ce fait, en sélectionnant un morceau qui agira en tant que stimulus pour une étude, il est possible que les participants possèdent différents niveaux de familiarité avec le morceau, ou que la difficulté du morceau ne convienne pas au niveau d'expertise de tous les participants. Une solution à ce problème pourrait être d'utiliser un passage musical composé spécifiquement pour l'étude (p. ex.

Drake & Palmer, 1993) ou un morceau plus obscur avec lequel les participants ne sont pas familiers (p. ex. Repp, 1997d). Cette solution entraîne cependant plusieurs compromis; il faut laisser assez de temps aux participants pour leur permettre d'apprendre le morceau — ce qui pourrait prendre plusieurs semaines —, ou utiliser un morceau facile à apprendre et allouer du temps de répétition avant de prendre la mesure. L'emploi d'un morceau trop facile pourrait toutefois ne pas refléter les compétences de pianistes plus avancés. Krampe et Ericsson (1996a) font part de ce souci :

However, the lack of technical difficulties of the piece raises issues about generalizing our results to age-related decline in experts' performance of difficult pieces that would be a challenge even for our experts. Finding a single complex piece that all of the young and older expert pianists had already mastered was unfortunately impossible. Furthermore, given the very long period of practice and preparation professional pianists require to prepare a piece to the desired level of perfection, it would not be realistic to assign them a specific piece to learn just for our study. (p. 355).

Une autre possibilité pourrait être de plutôt examiner les mouvements de base qui sont présents lors de la performance pianistique et forment la fondation de la technique des pianistes. Plusieurs études ont, par exemple, utilisé une tâche de tapement du doigt afin de comparer des musiciens et non-musiciens (Aoki et al., 2005; Ichihara & Inui, 2001; Repp & Doggett, 2007), des pianistes avancés et novices (Yamada & Tsumura, 1998), ou même des pianistes en bonne santé et d'autres atteints de dystonie focale (Kadota et al., 2010). De plus, la corrélation positive entre la durée d'un IOI et l'amplitude de sa variabilité a été remarquée tant dans le cadre d'une tâche de tapement du doigt que dans la performance d'un morceau (Repp, 1997d, 1999). Furuya et collègues ont quant à eux étudié la différence entre les mouvements de pianistes experts et

novices en observant, entre autres, la production d'octaves (Furuya & Kinoshita, 2008a, 2008b) et la production de trémolos à l'aide du pouce et de l'index (Furuya, Goda, et al., 2011).

Shaffer (1981) et Clarke (1982) sont toutefois d'avis qu'étudier la performance d'une tâche en examinant certains gestes isolés risque d'obscurcir certaines compétences qui sont le résultat de l'expertise. Clarke avance :

[T]he study of high-level skills cannot be investigated by analysing the properties of isolated components of that skill (tapping, simple hand movements, behaviour with monotone sequences) using subjects who are typically untrained or only go through a minimal laboratory training. It is one of the characteristics of skills that they possess a highly generative flexibility which is not shown in their unskilled counterparts. In the case of piano performance, it is this generative flexibility in the domain of timing (and dynamic) that allows a fixed structure (the score) to be realised in a large number of different interpretations and it seems likely that it is only in this context of flexibility that the properties of skilled musical timing will emerge. (p. 18).

La recherche sur la performance pianistique à travers l'étude de mouvements de base pourrait ainsi, dans certains cas, être trop détachée de son contexte original et ne pas refléter certaines propriétés qui émergent lors de la performance.

Peut-être, dans ce cas, la meilleure solution est plutôt d'étudier la performance de gammes. L'analyse de la performance de gamme répond à plusieurs des problèmes énoncés plus haut. Les pianistes sont généralement familiers avec ce type de stimuli, et ce, même à différents niveaux d'expertise. De plus, la performance de gamme est régie par des buts objectifs et communs, soit la régularité du rythme, de l'intensité et de l'articulation, rendant ainsi possible la

quantification de cette performance. Il a été démontré que l'analyse de gamme telle que développée par Jabusch et collègues (2004) est une manière efficace d'évaluer l'expertise (Jabusch et al., 2009) et certaines déficiences de coordination sensorimotrices (Cheng et al., 2013; Jabusch et al., 2004). L'étude de la performance de gammes semble donc être l'option la plus prometteuse à ce jour.

Qu'en est-il des chercheurs qui désirent étudier spécifiquement l'interprétation de morceaux, ou la performance de participants n'étant pas familiers avec l'exécution de gammes? Pour examiner plus attentivement cet enjeu, il est possible de consulter la littérature sur la variabilité de sports où, tout comme la performance pianistique, le « stimulus » n'est pas nécessairement toujours identique. Certaines études ont étudié la variabilité de sports où la qualité de la performance est subjective à l'aide des scores obtenus à chaque compétition, par exemple le surf (Mendez-Villanueva et al., 2010), la planche à neige (Malcata & Hopkins, 2014), ou le patinage artistique (Huang & Foote, 2011). Bien que la pratique de demander à des juges de compter la performance de participants soit également employée à l'occasion en performance pianistique (Ajero, 2007; Repp, 1997a), celle-ci n'offre pas d'informations sur les mouvements des pianistes ou même une multitude de paramètres globaux.

Bradshaw et collègues (2010) ont examiné la variabilité de gymnastes à la table de sauts en leur demandant d'exécuter une variété de sauts à chaque séance, ce qui couvre donc un plus large éventail que l'étude d'un seul type saut. Mack et collègues (2020) ont quant à eux examiné la performance de gymnastes lors d'exercices de compétition au sol en leur demandant d'effectuer trois manœuvres à 10 reprises. Les auteurs ont effectué un partitionnement de données (*cluster analysis*) afin de déterminer les schémas de mouvement prototypiques de la performance de ces exercices ; cette même méthode d'analyse peut être retrouvée dans Furuya et

collègues (2011) dans leur étude du mouvement de la main chez des pianistes. Les participants de cette étude ont joué une trentaine d'extraits provenant de différents morceaux et contenant une cinquantaine de séquences de tons et de doigtés. Les auteurs ont donc utilisé une variété de stimuli afin de couvrir une multitude de mouvements possibles, ce qui semble être la meilleure solution au problème posé. Il n'existe toutefois pas de réponse définitive à cet enjeu pour le moment; il serait donc bénéfique de conduire plus d'enquêtes sur ce phénomène et potentiellement développer un protocole standardisé qui fait l'emploi d'une variété de stimuli.

Pour conclure, le choix de stimulus dépend en fin de compte des objectifs du chercheur. Si l'étude cherche simplement à étudier la qualité esthétique d'une interprétation, l'emploi d'un jury pourrait être suffisant. Cependant, si le but est d'effectuer des comparaisons entre plusieurs performances intra ou inter-individuelles, l'emploi de stimuli variés et l'étude tant de paramètres globaux et techniques pourraient fournir davantage d'informations pertinentes et ainsi révéler des différences qu'un protocole moins varié n'aurait été en mesure de trouver.

4.5.2. L'expression

Une composante importante de la performance de morceaux est l'expression. Cette expression peut se manifester de multiples façons durant une performance selon les décisions interprétatives prises par le pianiste, par exemple, en alternant le rythme ou l'intensité d'un passage. Cela n'entraînerait pas de problème pour la recherche si ces décisions expressives étaient stables d'interprétation en interprétation. Cependant, plusieurs études présentées dans cette revue documentent que les performances de pianistes comportent des différences significatives qui sont le résultat de processus conscients et inconscients, ce qui pourrait être dans le but de donner à chaque interprétation une apparence spontanée (Chaffin et al., 2006, 2007; Demos et al., 2016). Clarke (1985), en référence aux performances données par le

participant dans son étude, rapporte : « [He] himself spontaneously commented that in playing this figure he was sometimes aiming to give emphasis to its beginning and sometimes to its end, although he did not elucidate the reasons for the different interpretations » (p. 309).

Ce phénomène est d'autant plus évident lorsque des performances expressives sont comparées à des performances « mécaniques », c'est-à-dire des interprétations où il fut demandé aux participants de jouer sans expression. En addition aux interprétations musicales de *Träumerei* évaluées par Penel et Drake (1998), ces derniers ont également récoltées une performance mécanique. Une comparaison des profils rythmiques des huit premières mesures et de leur répétition dans la même interprétation révèle un écart type moyen de 15,3% pour le profil musical et de 4,8% pour le profil mécanique (Figure 4.8). L'étude conduite par Drake et Palmer (1993) démontre un phénomène similaire pour l'intensité, l'articulation et le rythme.

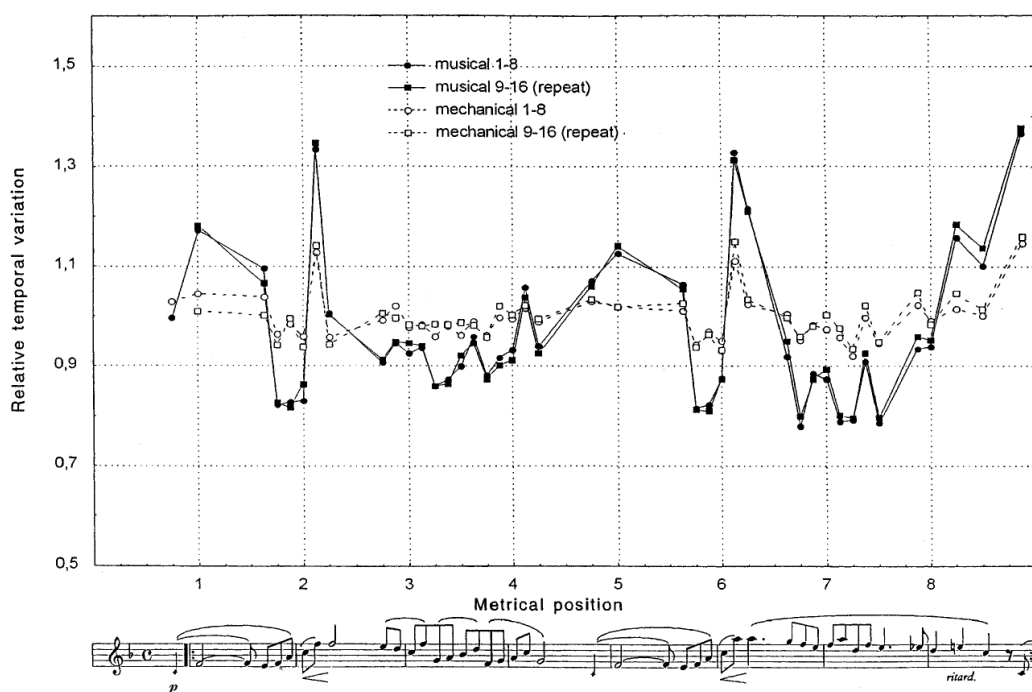


Figure 4.8. Profils rythmiques moyens pour les deux répétitions des huit premières mesures de *Träumerei* (indiquées sous le graphique) pour les performances musicales et mécaniques (Penel & Drake, 1998).

Ces données indiquent donc qu'en addition à la variabilité qui est inévitable lors de toute performance, une variabilité additionnelle entraînée par l'expression peut être observée dans l'interprétation de morceaux. Une solution possible est d'indiquer aux participants de conserver la même interprétation, ce qui peut être observé dans quelques études de cette revue (Ericsson et al., 1993; Keller et al., 2011; Krampe & Ericsson, 1996b; Repp, 1995b). Cette indication pourrait permettre de minimiser la variabilité additionnelle, quoique son efficacité n'ait jamais été enquêtée. Il pourrait être informatif d'étudier si une indication de la sorte contribue réellement à minimiser la variabilité intra-individuelle liée à l'expression.

4.5.3. Les facteurs environnementaux

Il existe certains autres facteurs pouvant influencer la variabilité de la performance. Il est bien documenté que les interprétations données par des pianistes peuvent changer en fonction du contexte de la performance (Clarke, 1985). Par exemple, la pianiste dont les performances ont été étudiées dans Chaffin et Logan (2006) admet avoir ralenti le tempo d'une de ses deux performances puisque celle-ci était à des fins d'enregistrement pour un CD. Le contexte dans lequel les performances sont observées devrait donc, lorsque possible, demeurer le même.

Un autre facteur à prendre en compte est le rythme circadien. Van Vugt et collègues (2013) ont démontré que la stabilité de la performance pianistique est affecté par le chronotype du pianiste. En outre, la performance de gamme chez des pianistes avec un chronotype de type soir était plus instable lors des séances matinales. Ce même effet ne fut pas observé chez les pianistes avec un chronotype de type matin lors des séances vespérales (**Figure 4.9**). De surcroît, si les performances sont observées lors de différentes journées, les séances devraient se dérouler au même moment de la journée, et idéalement en après-midi.

L'équipement est également un facteur à prendre en considération. Morgan et collègues (1994), dans le cadre d'une étude sur la course à pied, éliminent l'influence de l'équipement sur la variabilité en s'assurant que les participants portent les mêmes souliers et aient quelques minutes afin de s'ajuster au tapis roulant. Lorsqu'appliqué à la performance pianistique, il est possible de conclure que les performances devraient être observées sur le même piano.

Cependant, l'importance de cette suggestion peut être remise en question ; certaines études ont démontré que l'articulation et la régularité rythmique demeurent constantes sur différents instruments (Lipke-Perry et al., 2019; Repp, 1997c). Il est néanmoins probablement plus prudent d'évaluer les différentes interprétations sur le même piano. Dans la même veine, le banc devrait être ajusté à la même position, tant en matière de sa hauteur que de sa position par rapport au piano. Enfin, quelques minutes peuvent être accordées au pianiste afin que ce dernier puisse s'échauffer et s'ajuster à l'instrument (Ericsson et al., 1993).

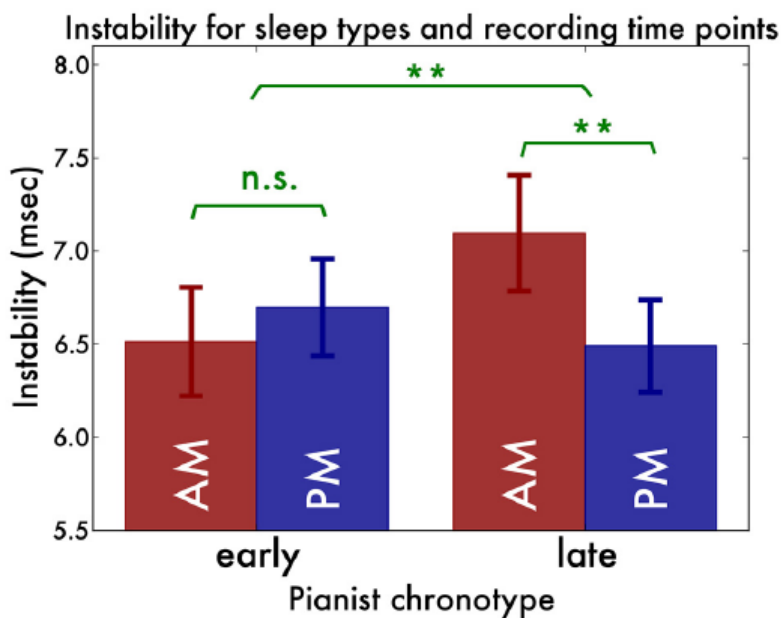


Figure 4.9. Instabilité rythmique en fonction de l'heure à laquelle les séances ont eu lieu et du chronotype des pianistes. Les barres rouges représentent les deux séances conduites à 8h, tandis que les barres bleues représentent les deux séances conduites à 20h. $**p < 0,01$ (Van Vugt, Treutler, et al., 2013).

Conclusion

La performance pianistique est, tout comme les activités sportives, sujette à varier de répétition en répétition en raison de la variabilité du mouvement. En apprendre plus sur la nature de cette variabilité et comment celle-ci se manifeste dans le cadre de la performance pianistique peut mener à une meilleure compréhension des processus cognitifs qui gouvernent la performance pianistique (Van Vugt et al., 2012; Van Vugt, Treutler, et al., 2013), à de meilleures procédures d'identification et de diagnostic de certaines pathologies affectant les pianistes (Jabusch et al., 2004), et au développement de protocoles de recherche plus robustes (Preatoni et al., 2013).

Cette revue exploratoire avait d'abord pour objectif de réunir les informations recueillies jusqu'à présent sur la variabilité de la performance pianistique en un seul document. Cet objectif a été accompli en (i) cataloguant les divers outils et méthodes d'analyse qui ont été employés afin de mesurer la performance pianistique et sa variabilité et comment ceux-ci se comparent à ceux employés dans le domaine de la biomécanique ; (ii) en arrivant à la conclusion que les données actuelles indiquent que la variabilité de la performance pianistique diminue plus le niveau d'expertise est élevé et ; (iii) en offrant certaines recommandations basées sur les données actuelles quant au nombre d'essais minimal afin d'obtenir une évaluation fiable de la performance pianistique. Cette synthèse a ainsi permis l'identification des lacunes dans notre compréhension de ces enjeux afin d'offrir des avenues pour la recherche future.

Cette revue avait également pour objectif d'identifier les défis propres à la performance pianistique lors de l'étude de la variabilité. Ce but a permis de déterminer trois enjeux spécifiques à la performance pianistique, soit (i) la sélection de stimuli ; (ii) l'expression et ; (iii) les facteurs environnementaux. Des solutions potentielles à ces défis ont été proposées afin

de permettre aux chercheurs de prendre ceux-ci en considération lors du développement de protocoles dans l'avenir.

L'étude de la variabilité dans des contextes sportifs et musicaux demeure un phénomène récent, mais dont l'importance ne peut être sous-estimée. Cette revue fait partie des premiers pas dans la recherche sur la variabilité de la 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 les pianistes que les chercheurs.

Liste des références de la revue exploratoire

- Chaffin, R., Imreh, G., Crawford, M., Imreh, G., & Crawford, M. (2005). *Practicing Perfection : Memory and Piano Performance*. Psychology Press.
<https://doi.org/10.4324/9781410612373>
- Chaffin, R., Lemieux, A. F., & Chen, C. (2006). Spontaneity and creativity in highly practised performance. Dans I. Deliège & G. A. Wiggins (Éds.), *Musical Creativity : Multidisciplinary Research in Theory and Practice* (p. 200-218). Psychology Press.
<https://doi.org/10.4324/9780203088111-24>
- Chaffin, R., Lemieux, A. F., & Chen, C. (2007). « It is different each time I play » : Variability in highly prepared musical performance. *Music Perception*, 24(5), 455-472.
<https://doi.org/10.1525/mp.2007.24.5.455>
- Chaffin, R., & Logan, T. (2006). Practicing perfection : How concert soloists prepare for performance. *Advances in Cognitive Psychology*, 2(2-3), 113-130.
- Cheng, F. P.-H., Grossbach, M., & Altenmüller, E. (2013). Altered Sensory Feedbacks in Pianist's Dystonia : The altered auditory feedback paradigm and the glove effect. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00868>
- Clarke, E. F. (1982). Timing in the performance of Erik Satie's 'Vexations'. *Acta Psychologica*, 50(1), 1-19. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(82\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(82)90047-6)
- Clarke, E. F. (1985). Some Aspects of Rhythm and Expression in Performances of Erik Satie's « Gnossienne No. 5 ». *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 2(3), 299-328.
<https://doi.org/10.2307/40285301>

- Demos, A. P., Lisboa, T., & Chaffin, R. (2016). Flexibility of Expressive Timing in Repeated Musical Performances. *Frontiers in Psychology*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01490>
- Drake, C., & Palmer, C. (1993). Accent Structures in Music Performance. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 10(3), 343-378. <https://doi.org/10.2307/40285574>
- Drake, C., & Palmer, C. (2000). Skill acquisition in music performance : Relations between planning and temporal control. *Cognition*, 74(1), 1-32.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. Th., & Tesch-Römer, C. (1993). The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance. *Psychological Review*, 100(3), 363-406.
<https://doi.org/10.1037//0033-295X.100.3.363>
- Heinlein, C. P. (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*, 2(4), 489-508.
<https://doi.org/10.1080/00221309.1929.9918087>
- Jabusch, H.-C., Alpers, H., Kopiez, R., Vauth, H., & Altenmüller, E. (2009). The influence of practice on the development of motor skills in pianists : A longitudinal study in a selected motor task. *Human Movement Science*, 28(1), 74-84.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2008.08.001>
- Jabusch, H.-C., Vauth, H., & Altenmüller, E. (2004). Quantification of focal dystonia in pianists using scale analysis. *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, 19(2), 171-180. <https://doi.org/10.1002/mds.10671>
- Jabusch, H.-C., Yong, R. M., & Altenmüller, E. (2007). Biographical predictors of music-related motor skills in children pianists.

- Keller, P. E., Weber, A., & Engel, A. (2011). Practice Makes Too Perfect : Fluctuations in Loudness Indicate Spontaneity in Musical Improvisation. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 29(1), 109-114. <https://doi.org/10.1525/mp.2011.29.1.109>
- Kopiez, R., Jabusch, H.-C., Galley, N., Homann, J.-C., Lehmann, A. C., & Altenmüller, E. (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*, 40(3), 357-384.
<https://doi.org/10.1177/0305735610394708>
- Krampe, R. T., & Ericsson, K. A. (1996). Maintaining excellence : Deliberate practice and elite performance in young and older pianists. *Journal of Experimental Psychology. General*, 125(4), 331-359.
- Lipke-Perry, T., Dutto, D. J., & Levy, M. (2019). The Piano Keyboard as Task Constraint : Timing Patterns of Pianists' Scales Persist Across Instruments. *Music & Science*, 2, 2059204319870733. <https://doi.org/10.1177/2059204319870733>
- MacKenzie, C. L., & Van Eerd, D. L. (1990). Rhythmic precision in the performance of piano scales : Motor psychophysics and motor programming. Dans *Attention and performance 13 : Motor representation and control* (p. 375-408). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- MacKenzie, C. L., Vaneerd, D. L., Graham, E. D., Huron, D. B., & Wills, B. L. (1986). The Effect of Tonal Structure on Rhythm in Piano Performance. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 4(2), 215-225. <https://doi.org/10.2307/40285361>
- Palmer, C. (1996). Anatomy of a Performance : Sources of Musical Expression. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 13(3), 433-453.
<https://doi.org/10.2307/40286178>

- Palmer, C., & van de Sande, C. (1993). Units of knowledge in music performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19(2), 457-470.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.19.2.457>
- Penel, A., & Drake, C. (1998). Sources of timing variations in music performance : A psychological segmentation model. *Psychological Research*, 61(1), 12-32.
- Repp, B. 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*, 92(5), 2546-2568. <https://doi.org/10.1121/1.404425>
- Repp, B. H. (1994). On Determining the Basic Tempo of an Expressive Music Performance. *Psychology of Music*, 22(2), 157-167. <https://doi.org/10.1177/0305735694222005>
- Repp, B. H. (1995a). Acoustics, perception, and production of legato articulation on a digital piano. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(6), 3862-3874.
<https://doi.org/10.1121/1.413065>
- Repp, B. H. (1995b). Expressive timing in Schumann's "Träumerei:" An analysis of performances by graduate student pianists. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5), 2413-2427. <https://doi.org/10.1121/1.413276>
- Repp, B. H. (1996a). Pedal Timing and Tempo in Expressive Piano Performance : A Preliminary Investigation. *Psychology of Music*, 24(2), 199-221.
<https://doi.org/10.1177/0305735696242011>
- Repp, B. H. (1996b). The Art of Inaccuracy : Why Pianists' Errors Are Difficult to Hear. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 14(2), 161-183.
<https://doi.org/10.2307/40285716>

- Repp, B. H. (1996c). The dynamics of expressive piano performance : Schumann's "Träumerei" revisited. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(1), 641-650.
<https://doi.org/10.1121/1.415889>
- Repp, B. H. (1997a). Some Observations on Pianists' Timing of Arpeggiated Chords. *Psychology of Music*, 25(2), 133-148. <https://doi.org/10.1177/0305735697252004>
- Repp, B. H. (1997b). Expressive Timing in a Debussy Prelude : A Comparison of Student and Expert Pianists. *Musicae Scientiae*, 1(2), 257-268.
<https://doi.org/10.1177/102986499700100206>
- Repp, B. H. (1997c). Acoustics, perception, and production of legato articulation on a computer-controlled grand piano. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(3), 1878-1890. <https://doi.org/10.1121/1.420110>
- Repp, B. H. (1997d). Variability of timing in expressive piano performance increases with interval duration. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4(4), 530-534.
<https://doi.org/10.3758/BF03214344>
- Repp, B. H. (1999). Control of Expressive and Metronomic Timing in Pianists. *Journal of Motor Behavior*, 31(2), 145.
- Salmon, P., & Newmark, J. (1989). Clinical applications of MIDI technology. *Medical Problems of Performing Artists*, 4(1), 25-31.
- Shaffer, L. H. (1981). Performances of Chopin, Bach, and Bartok : Studies in motor programming. *Cognitive Psychology*, 13(3), 326-376. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(81\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(81)90013-X)

- Van Vugt, F. T., & Altenmüller, E. (2019). On the One Hand or on the Other : Trade-Off in Timing Precision in Bimanual Musical Scale Playing. *Advances in Cognitive Psychology*, 15(3), 216-225. <https://doi.org/10.5709/acp-0271-5>
- Van Vugt, F. T., Furuya, S., Vauth, H., Jabusch, H.-C., & Altenmüller, E. (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*, 232(11), 3555-3567. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4036-4>
- Van Vugt, F. T., Jabusch, H.-C., & Altenmüller, E. (2012). Fingers Phrase Music Differently : Trial-to-Trial Variability in Piano Scale Playing and Auditory Perception Reveal Motor Chunking. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00495>
- Van Vugt, F. T., Jabusch, H.-C., & Altenmüller, E. (2013). Individuality That is Unheard of : Systematic Temporal Deviations in Scale Playing Leave an Inaudible Pianistic Fingerprint. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00134>
- Van Vugt, F. T., Treutler, K., Altenmüller, E., & Jabusch, H.-C. (2013). The influence of chronotype on making music : Circadian fluctuations in pianists' fine motor skills. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00347>
- Vaquero, L., Hartmann, K., Ripollés, P., Rojo, N., Sierpowska, J., François, C., Càmarà, E., van Vugt, F. T., Mohammadi, B., Samii, A., Münte, T. F., Rodríguez-Fornells, A., & Altenmüller, E. (2016). Structural neuroplasticity in expert pianists depends on the age of musical training onset. *NeuroImage*, 126, 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.008>
- Wagner, C. (1971). The influence of the tempo of playing on the rhythmic structure studied at pianists playing scales. *Medicine and Sport*, 6(Biomechanics II), 129-132.

Wagner, C., Piontek, E., & Teckhaus, L. (1973). Piano Learning and Programed Instruction.

Journal of Research in Music Education, 21(2), 106-122.

<https://doi.org/10.2307/3344587>

Windsor, W. L., & Clarke, E. F. (1997). Expressive Timing and Dynamics in Real and Artificial

Musical Performances : Using an Algorithm as an Analytical Tool. *Music Perception: An*

Interdisciplinary Journal, 15(2), 127-152. <https://doi.org/10.2307/40285746>

Bibliographie de la thèse

- Ajero, M. (2007). The effects of computer -assisted keyboard technology and MIDI accompaniments on group piano students' performance accuracy and attitudes [Ph.D., The University of Oklahoma].
<http://search.proquest.com/docview/304835530/abstract/A5A80F1E392D4D6FPQ/1>
- Aoki, T., Furuya, S., & Kinoshita, H. (2005). Finger-Tapping Ability in Male and Female Pianists and Nonmusician Controls. *Motor Control*, 9(1), 23.
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies : Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19-32.
<https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Arutyunyan, G. A., Gurfinkel' V.s., & Mirskii, M. L. (1968). Investigation of aiming at a target. *Biophysics*, 13(3). <https://elibrary.ru/item.asp?id=31106552>
- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 26(4), 217-238. <https://doi.org/10.2165/00007256-199826040-00002>
- Barbado, D., Sabido Solana, R., Vera-Garcia, F. J., Gusi Fuertes, N., & Moreno, F. J. (2012). Effect of increasing difficulty in standing balance tasks with visual feedback on postural sway and EMG : Complexity and performance. *Human Movement Science*, 31(5), 1224-1237. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.01.002>
- Bartlett, R., Wheat, J., & Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomechanics*, 6(2), 224-243.
<https://doi.org/10.1080/14763140701322994>

- Bates, B. T., Dufek, J. S., & Davis, H. P. (1992). The effect of trial size on statistical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(9), 1059-1065.
- Bates, B. T., Osternig, L. R., Sawhill, J. A., & James, S. L. (1983). An assessment of subject variability, subject-shoe interaction, and the evaluation of running shoes using ground reaction force data. *Journal of Biomechanics*, 16(3), 181-191.
[https://doi.org/10.1016/0021-9290\(83\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(83)90125-2)
- Bengtsson, I., & Gabrielsson, A. (1980). Methods for analyzing performance of musical rhythm. *Scandinavian Journal of Psychology*, 21(1), 257-268. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1980.tb00369.x>
- Bengtsson, I., & Gabrielsson, I. (1983). Analysis and synthesis of musical rhythm. Dans J. Sundberg (Éd.), *Studies of Music Performance* (Vol. 31, p. 27-60). Royal Swedish Academy of Music.
- Bradshaw, E., Hume, P., Calton, M., & Aisbett, B. (2010). Reliability and variability of day-to-day vault training measures in artistic gymnastics. *Sports Biomechanics*, 9(2), 79-97.
<https://doi.org/10.1080/14763141.2010.488298>
- Bresin, R. (2002). Importance of note-level control in automatic music performance.
- Bresin, R., & Battel, G. U. (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*, 29(3), 211-224. <https://doi.org/10.1076/jnmr.29.3.211.3092>
- Caballero, C., Javier Moreno, F., Reina, R., Roldán, A., Coves, Á., & Barbado, D. (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 y Las Capacidades Individuales. *Motricidad: European Journal of Human Movement*, 38, 12-26.
- Chaffin, R., Lemieux, A. F., & Chen, C. (2006). Spontaneity and creativity in highly practised performance. Dans I. Deliège & G. A. Wiggins (Éds.), *Musical Creativity : Multidisciplinary Research in Theory and Practice* (p. 200-218). Psychology Press.
<https://doi.org/10.4324/9780203088111-24>
- Chaffin, R., Lemieux, A. F., & Chen, C. (2007). « It is different each time I play » : Variability in highly prepared musical performance. *Music Perception*, 24(5), 455-472.
<https://doi.org/10.1525/mp.2007.24.5.455>
- Chaffin, R., & Logan, T. (2006). Practicing perfection : How concert soloists prepare for performance. *Advances in Cognitive Psychology*, 2(2-3), 113-130.
- Chapman, A., Vicenzino, B., Blanch, P., & Hodges, P. (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*, 12(1), 31-34.
<https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.08.012>
- Chau, T., & Parker, K. (2004). On the robustness of stride frequency estimation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(2), 294-303.
<https://doi.org/10.1109/TBME.2003.820396>
- Chau, T., Young, S., & Redekop, S. (2005). Managing variability in the summary and comparison of gait data. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2, 22.
<https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-22>

- Cheng, F. P.-H., Grossbach, M., & Altenmüller, E. (2013). Altered Sensory Feedbacks in Pianist's Dystonia : The altered auditory feedback paradigm and the glove effect. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00868>
- Churchland, M. M., Afshar, A., & Shenoy, K. V. (2006). A Central Source of Movement Variability. *Neuron*, 52(6), 1085-1096. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.10.034>
- Clarke, E. F. (1982). Timing in the performance of Erik Satie's 'Vexations'. *Acta Psychologica*, 50(1), 1-19. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(82\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(82)90047-6)
- Clarke, E. F. (1985). Some Aspects of Rhythm and Expression in Performances of Erik Satie's « Gnossienne No. 5 ». *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 2(3), 299-328. <https://doi.org/10.2307/40285301>
- Conley, D. L., & Krahenbuhl, G. S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(5), 357-360.
- Davids, K., Glazier, P., Araújo, D., & Bartlett, R. (2003). Movement Systems as Dynamical Systems : The Functional Role of Variability and its Implications for Sports Medicine. *Sports Medicine*, 33(4), 245-260. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333040-00001>
- Davis, P. L. (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 [Ph.D., The University of Oklahoma]. <http://search.proquest.com/docview/304715142/abstract/8E7B5FF151CD4CD3PQ/1>
- Deluzio, K. J., & Astephen, J. L. (2007). Biomechanical features of gait waveform data associated with knee osteoarthritis : An application of principal component analysis. *Gait & Posture*, 25(1), 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.01.007>

- Deluzio, K. J., Wyss, U. P., Costigan, P. A., Sorbie, C., & Zee, B. (1999). Gait assessment in unicompartmental knee arthroplasty patients : Principal component modelling of gait waveforms and clinical status. *Human Movement Science*, 18(5), 701-711.
[https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(99\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(99)00030-5)
- Demos, A. P., Lisboa, T., & Chaffin, R. (2016). Flexibility of Expressive Timing in Repeated Musical Performances. *Frontiers in Psychology*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01490>
- DeVita, P., & Bates, B. T. (1988). Intraday reliability of ground reaction force data. *Human Movement Science*, 7(1), 73-85. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(88\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0167-9457(88)90005-X)
- Drake, C., & Palmer, C. (1993). Accent Structures in Music Performance. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 10(3), 343-378. <https://doi.org/10.2307/40285574>
- Drake, C., & Palmer, C. (2000). Skill acquisition in music performance : Relations between planning and temporal control. *Cognition*, 74(1), 1-32.
- Duhamel, A., Bourriez, J. L., Devos, P., Krystkowiak, P., Destée, A., Derambure, P., & Defebvre, L. (2004). Statistical tools for clinical gait analysis. *Gait & Posture*, 20(2), 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2003.09.010>
- Engel, K. C., Flanders, M., & Soechting, J. F. (1997). Anticipatory and sequential motor control in piano playing. *Experimental Brain Research*, 113(2), 189-199.
<https://doi.org/10.1007/BF02450317>
- Ericsson, K. A., Krampe, R. Th., & Tesch-Römer, C. (1993). The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance. *Psychological Review*, 100(3), 363-406.
<https://doi.org/10.1037//0033-295X.100.3.363>

- Ferber, R., McClay Davis, I., Williams, D. S., & Laughton, C. (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*, 20(6), 1139-1145. [https://doi.org/10.1016/S0736-0266\(02\)00077-3](https://doi.org/10.1016/S0736-0266(02)00077-3)
- Finney, S. A. (1997). Auditory Feedback and Musical Keyboard Performance. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 15(2), 153-174. <https://doi.org/10.2307/40285747>
- Fleisig, G., Chu, Y., Weber, A., & Andrews, J. (2009). Variability in baseball pitching biomechanics among various levels of competition. *Sports Biomechanics*, 8(1), 10-21. <https://doi.org/10.1080/14763140802629958>
- Furuya, S., Flanders, M., & Soechting, J. F. (2011). Hand kinematics of piano playing. *Journal of Neurophysiology*, 106(6), 2849-2864. <https://doi.org/10.1152/jn.00378.2011>
- Furuya, S., Goda, T., Katayose, H., Miwa, H., & Nagata, N. (2011). Distinct Inter-Joint Coordination during Fast Alternate Keystrokes in Pianists with Superior Skill. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00050>
- Furuya, S., & Kinoshita, H. (2008a). Organization of the upper limb movement for piano key-depression differs between expert pianists and novice players. *Experimental Brain Research*, 185(4), 581-593. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1184-9>
- Furuya, S., & Kinoshita, H. (2008b). Expertise-dependent modulation of muscular and non-muscular torques in multi-joint arm movements during piano keystroke. *Neuroscience*, 156(2), 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2008.07.028>
- Glazier, P. S., & Davids, K. (2009). On analysing and interpreting variability in motor output. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(4), e2-3; author reply e4-5. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.03.010>

- Hamill, J., & McNiven, S. L. (1990). Reliability of selected ground reaction force parameters during walking. *Human Movement Science*, 9(2), 117-131. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(90\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0167-9457(90)90023-7)
- Hamill, J., van Emmerik, R. E., Heiderscheit, B. C., & Li, L. (1999). A dynamical systems approach to lower extremity running injuries. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 14(5), 297-308. [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(98\)90092-4](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(98)90092-4)
- Hanin, Y., & Hanina, M. (2009). Optimization of Performance in Top-Level Athletes : An Action-Focused Coping Approach. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 4(1), 47-91. <https://doi.org/10.1260/1747-9541.4.1.47>
- Harris, C. M., & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394(6695), 780-784. <https://doi.org/10.1038/29528>
- Hartmann, A. (1932). Untersuchungen über das metrische Verhalten in musikalischen Interpretationsvarianten [Investigation about the metric relationships in musical interpretation variants]. *Archiv für die gesamte Psychologie*, 84, 103-192.
- Heinlein, C. P. (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*, 2(4), 489-508. <https://doi.org/10.1080/00221309.1929.9918087>
- Henley, P. T. (1999). The effect of *modeling and tempo gradations as practice techniques on the performance of high school instrumentalists [Ph.D., Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College]. <http://search.proquest.com/docview/304511283/abstract/2CF894F3450B46FCPQ/1>

- Hiley, M. J., Zuevsky, V. V., & Yeadon, M. R. (2013). Is skilled technique characterized by high or low variability? An analysis of high bar giant circles. *Human Movement Science*, 32(1), 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.11.007>
- Honing, H. (2003). The Final Ritard : On Music, Motion, and Kinematic Models. *Computer Music Journal*, 27(3), 66-72. <https://doi.org/10.1162/014892603322482538>
- Huang, J., & Foote, C. J. (2011). Using Generalizability Theory to Examine Scoring Reliability and Variability of Judging Panels in Skating Competitions. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, 7(3). <https://doi.org/10.2202/1559-0410.1241>
- Ichihara, T., & Inui, N. (2001). Independence of Timing and Force Control during Finger-Tapping Sequences by Pianists. *Perceptual and Motor Skills*, 93(2), 556-558. <https://doi.org/10.2466/pms.2001.93.2.556>
- Jabusch, H.-C., Alpers, H., Kopiez, R., Vauth, H., & Altenmüller, E. (2009). The influence of practice on the development of motor skills in pianists : A longitudinal study in a selected motor task. *Human Movement Science*, 28(1), 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2008.08.001>
- Jabusch, H.-C., Vauth, H., & Altenmüller, E. (2004). Quantification of focal dystonia in pianists using scale analysis. *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, 19(2), 171-180. <https://doi.org/10.1002/mds.10671>
- Jabusch, H.-C., Yong, R. M., & Altenmüller, E. (2007). Biographical predictors of music-related motor skills in children pianists.
- Johnson, C. M. (2000). Effect of Adding Interpretive Elements to a Musical Performance on the Rhythmic and Dynamic Variations. *Bulletin of the Council for Research in Music Education*, 147, 91-96.

Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E., Gainey, J., Gorton, G., & Cochran, G. V.

B. (1989). Repeatability of kinematic, kinetic, and electromyographic data in normal adult gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 7(6), 849-860.

<https://doi.org/10.1002/jor.1100070611>

Kadota, H., Nakajima, Y., Miyazaki, M., Sekiguchi, H., Kohno, Y., Amako, M., Arino, H.,

Nemoto, K., & Sakai, N. (2010). An fMRI study of musicians with focal dystonia during tapping tasks. *Journal of Neurology*, 257(7), 1092-1098. <https://doi.org/10.1007/s00415-010-5468-9>

Karamanidis, K., Arampatzis, A., & Bruggemann, G.-P. (2003). Symmetry and Reproducibility of Kinematic Parameters during Various Running Techniques. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(6), 1009-1016.

Keller, P. E., Weber, A., & Engel, A. (2011). Practice Makes Too Perfect : Fluctuations in Loudness Indicate Spontaneity in Musical Improvisation. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 29(1), 109-114. <https://doi.org/10.1525/mp.2011.29.1.109>

Kopiez, R., Jabusch, H.-C., Galley, N., Homann, J.-C., Lehmann, A. C., & Altenmüller, E. (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*, 40(3), 357-384.

<https://doi.org/10.1177/0305735610394708>

Krampe, R. T. (1994). Maintaining excellence : Cognitive-motor performance in pianists differing in age and skill level. *Max-Planck-Institut für Bildungsforschung*.

- Krampe, R. T., & Ericsson, K. A. (1996a). Maintaining excellence : Deliberate practice and elite performance in young and older pianists. *Journal of Experimental Psychology. General*, 125(4), 331-359.
- Krampe, R. T., & Ericsson, K. A. (1996b). Maintaining excellence : Deliberate practice and elite performance in young and older pianists. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125(4), 331-359.
- Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schöner, G. (2002). Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 30(1), 26-31.
- Lipke-Perry, T., Dutto, D. J., & Levy, M. (2019). The Piano Keyboard as Task Constraint : Timing Patterns of Pianists' Scales Persist Across Instruments. *Music & Science*, 2, 2059204319870733. <https://doi.org/10.1177/2059204319870733>
- Mack, M., Federbusch, S., Ferber, M., & Heinen, T. (2020). Movement prototypes and their relationship in the performance of a gymnastics floor routine. *Journal of Human Sport & Exercise*, 15(2), 303-318.
- MacKenzie, C. L., Nelson-Schultz, J. A., & Wills, B. L. (1983). A Preliminary Investigation of Motor Programming in Piano Performance as a Function of Skill Level. Dans D. Rogers & J. A. Sloboda (Éds.), *The Acquisition of Symbolic Skills* (p. 283-292). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3724-9_32
- MacKenzie, C. L., & Van Eerd, D. L. (1990). Rhythmic precision in the performance of piano scales : Motor psychophysics and motor programming. Dans *Attention and performance 13 : Motor representation and control* (p. 375-408). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

- Malcata, R. M., & Hopkins, W. G. (2014). Variability of Competitive Performance of Elite Athletes : A Systematic Review. *Sports Medicine*, 44(12), 1763-1774.
<https://doi.org/10.1007/s40279-014-0239-x>
- Mendez-Villanueva, A., Mujika, I., & Bishop, D. (2010). Variability of competitive performance assessment of elite surfboard riders. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(1), 135-139. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181a61a3a>
- Messier, J., & Kalaska, J. F. (1999). Comparison of variability of initial kinematics and endpoints of reaching movements. *Experimental Brain Research*, 125(2), 139-152.
<https://doi.org/10.1007/s002210050669>
- Morgan, D. W., Craib, M. W., Krahenbuhl, G. S., Woodall, K., Jordan, S., Filarski, K., Burleson, C., & Williams, T. (1994). Daily Variability in Running Economy Among Well-Trained Male and Female Distance Runners. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 65(1), 72-77. <https://doi.org/10.1080/02701367.1994.10762210>
- Morgan, D. W., Martin, P. E., Krahenbuhl, G. S., & Baldini, F. D. (1991). Variability in running economy and mechanics among trained male runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 23(3), 378-383.
- Morriss, C. (1997). Biomechanical analysis of the men's javelin throw at the 1995 World Championships in Athletics. *IAAF New Studies in Athletics*, 12(2/3), S. 31-41.
- Mullineaux, D. R., Bartlett, R. M., & Bennett, S. (2001). Research design and statistics in biomechanics and motor control. *Journal of Sports Sciences*, 19(10), 739.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. Dans M. G. Wade & H. T. A. Whiting, *Motor development in children : Aspects of coordination and control* (p. 341-360). Dordrecht, The Netherlands: Martinus Nijhoff.

- Newell, K. M., & Ranganathan, R. (2009). Some contemporary issues in motor learning. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 629, 395-404.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-77064-2_20
- Osborne, L. C., Lisberger, S. G., & Bialek, W. (2005). A sensory source for motor variation. *Nature*, 437(7057), 412-417. <https://doi.org/10.1038/nature03961>
- Palmer, C. (1996). Anatomy of a Performance : Sources of Musical Expression. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 13(3), 433-453.
<https://doi.org/10.2307/40286178>
- Palmer, C., & Krumhansl, C. L. (1987). Independent temporal and pitch structures in determination of musical phrases. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(1), 116-126.
- Palmer, C., & van de Sande, C. (1993). Units of knowledge in music performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19(2), 457-470.
<https://doi.org/10.1037/0278-7393.19.2.457>
- Payton, C. J., & Bartlett, R. (2007). *Biomechanical Evaluation of Movement in Sport and Exercise : The British Association of Sport and Exercise Sciences Guide*. Routledge.
- Penel, A., & Drake, C. (1998). Sources of timing variations in music performance : A psychological segmentation model. *Psychological Research*, 61(1), 12-32.
- Povel, D.-J. (1977). Temporal structure of performed music : Some preliminary observations. *Acta Psychologica*, 41(4), 309-320. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(77\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0001-6918(77)90024-5)
- Preatoni, E. (2007). Innovative methods for the analysis of sports movements and for the longitudinal monitoring of individual motor skills.

<https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/innovative-methods-for-the-analysis-of-sports-movements-and-for-t>

- Preatoni, E., Ferrario, M., Donà, G., Hamill, J., & Rodano, R. (2010). Motor variability in sports : A non-linear analysis of race walking. *Journal of Sports Sciences*, 28(12), 1327-1336. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.507250>
- Preatoni, E., Hamill, J., Harrison, A. J., Hayes, K., Van Emmerik, R. E. A., Wilson, C., & Rodano, R. (2013). Movement variability and skills monitoring in sports. *Sports Biomechanics*, 12(2), 69-92. <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.738700>
- Preatoni, E., La Torre, A., Santambrogio, G., & Rodano, R. (2010). Motion analysis in sports monitoring techniques : Assessment protocols and application to racewalking. *Medicina Dello Sport*, 63, 327-342.
- Queen, R. M., Gross, M. T., & Liu, H.-Y. (2006). Repeatability of lower extremity kinetics and kinematics for standardized and self-selected running speeds. *Gait & Posture*, 23(3), 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.03.007>
- Ramsay, J. O., & Dalzell, C. J. (1991). Some Tools for Functional Data Analysis. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 53(3), 539-572.
- Repp, B. 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*, 92(5), 2546-2568. <https://doi.org/10.1121/1.404425>
- Repp, B. H. (1995a). Acoustics, perception, and production of legato articulation on a digital piano. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(6), 3862-3874. <https://doi.org/10.1121/1.413065>

- Repp, B. H. (1995b). Expressive timing in Schumann's "Träumerei." An analysis of performances by graduate student pianists. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5), 2413-2427. <https://doi.org/10.1121/1.413276>
- Repp, B. H. (1996a). Pedal Timing and Tempo in Expressive Piano Performance : A Preliminary Investigation. *Psychology of Music*, 24(2), 199-221.
<https://doi.org/10.1177/0305735696242011>
- Repp, B. H. (1996b). The Art of Inaccuracy : Why Pianists' Errors Are Difficult to Hear. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 14(2), 161-183.
<https://doi.org/10.2307/40285716>
- Repp, B. H. (1996c). The dynamics of expressive piano performance : Schumann's "Träumerei" revisited. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(1), 641-650.
<https://doi.org/10.1121/1.415889>
- Repp, B. H. (1997a). The Aesthetic Quality of a Quantitatively Average Music Performance : Two Preliminary Experiments. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 14(4), 419-444. <https://doi.org/10.2307/40285732>
- Repp, B. H. (1997b). Expressive Timing in a Debussy Prelude : A Comparison of Student and Expert Pianists. *Musicae Scientiae*, 1(2), 257-268.
<https://doi.org/10.1177/102986499700100206>
- Repp, B. H. (1997c). Acoustics, perception, and production of legato articulation on a computer-controlled grand piano. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(3), 1878-1890. <https://doi.org/10.1121/1.420110>

- Repp, B. H. (1997d). Variability of timing in expressive piano performance increases with interval duration. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4(4), 530-534.
<https://doi.org/10.3758/BF03214344>
- Repp, B. H. (1998). A microcosm of musical expression. I. Quantitative analysis of pianists' timing in the initial measures of Chopin's Etude in E major. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(2 Pt 1), 1085-1100. <https://doi.org/10.1121/1.423325>
- Repp, B. H. (1999). Control of Expressive and Metronomic Timing in Pianists. *Journal of Motor Behavior*, 31(2), 145.
- Repp, B. H., & Doggett, R. (2007). Tapping to a Very Slow Beat : A Comparison of Musicians and Nonmusicians. *Music Perception*, 24(4), 367-376.
- Robins, R., Wheat, J., Irwin, G., & Bartlett, R. M. (2006). The Effect of Shooting Distance on Movement Variability in Basketball. *Journal of Human Movement Studies*, 50, 217-238.
- Rodano, R., & Squadrone, R. (2002). Stability of Selected Lower Limb Joint Kinetic Parameters during Vertical Jump. *Journal of Applied Biomechanics*, 18(1), 83-89.
<https://doi.org/10.1123/jab.18.1.83>
- Rogers, D. M., Turley, K. R., Kujawa, K. I., Harper, K. M., & Wilmore, J. H. (1994). The Reliability and Variability of Running Economy in 7-, 8-, and 9-Year-Old Children. *Pediatric Exercise Science*, 6(3), 287-296. <https://doi.org/10.1123/pes.6.3.287>
- Ryan, W., Harrison, A., & Hayes, K. (2006). Functional data analysis of knee joint kinematics in the vertical jump. *Sports Biomechanics*, 5(1), 121-138.
<https://doi.org/10.1080/14763141.2006.9628228>
- Salmon, P., & Newmark, J. (1989). Clinical applications of MIDI technology. *Medical Problems of Performing Artists*, 4(1), 25-31.

- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2011). *Motor control and learning : A behavioral emphasis*, 5th ed (p. ix, 581). Human Kinetics.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn Jr., J. T. (1979). Motor-output variability : A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 86(5), 415-451. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.86.5.415>
- Schöllhorn, W. I., & Bauer, H. U. (1998). IDENTIFYING INDIVIDUAL MOVEMENT STYLES IN HIGH PERFORMANCE SPORTS BY MEANS OF SELF-ORGANIZING KOHONEN MAPS. *ISBS - Conference Proceedings Archive*. <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/1556>
- Sears, C. H. (1902). A Contribution to the Psychology of Rhythm. *The American Journal of Psychology*, 13(1), 28-61. <https://doi.org/10.2307/1412203>
- Seashore, C. E. (1938). The Psychology of Music. *Music Educators Journal*, 25(3), 23-23. <https://doi.org/10.2307/3385515>
- Shaffer, L. H. (1980). Analyzing piano performance : A study of concert pianists. Dans G. E. Stelmach & J. Requin (Éds.), *Tutorials in Motor Behavior* (Amsterdam: North-Holland.).
- Shaffer, L. H. (1981). Performances of Chopin, Bach, and Bartok : Studies in motor programming. *Cognitive Psychology*, 13(3), 326-376. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(81\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(81)90013-X)
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Shmuelof, L., Krakauer, J. W., & Mazzoni, P. (2012). How is a motor skill learned? Change and invariance at the levels of task success and trajectory control. *Journal of Neurophysiology*, 108(2), 578-594. <https://doi.org/10.1152/jn.00856.2011>

- Shrout, P. E. (1998). Measurement reliability and agreement in psychiatry. *Statistical Methods in Medical Research*, 7(3), 301-317. <https://doi.org/10.1177/096228029800700306>
- Sidaway, B. (1995). Quantifying the variability of angle-angle plots. *Journal of Human Movement Studies*, 29(4), S. 181-197.
- Slade, T. (2018). Measurable Changes in Piano Performance Following a Body Mapping Workshop [Thesis, Université d'Ottawa / University of Ottawa].
<http://dx.doi.org/10.20381/ruor-21860>
- Stergiou, N. (2004). Innovative analyses of human movement. Champaign, IL : Human Kinetics.
<https://trove.nla.gov.au/version/27330673>
- Sutherland, D. h, Kaufman, K. R., Campbell, K., Ambrosini, D., & Wyatt, M. (1996). Clinical use of prediction regions for motion analysis. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 38(9), 773-781. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1996.tb15111.x>
- Tepavac, D., & Field-Fote, E. C. (2001). Vector Coding : A Technique for Quantification of Intersegmental Coupling in Multicyclic Behaviors. *Journal of Applied Biomechanics*, 17(3), 259-270. <https://doi.org/10.1123/jab.17.3.259>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., ... Straus, S. E. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) : Checklist and Explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467-473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>

- Van Emmerik, R. E., Wagenaar, R. C., Winogrodzka, A., & Wolters, E. C. (1999). Identification of axial rigidity during locomotion in Parkinson disease. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 80(2), 186-191. [https://doi.org/10.1016/s0003-9993\(99\)90119-3](https://doi.org/10.1016/s0003-9993(99)90119-3)
- Van Vugt, F. T., & Altenmüller, E. (2019). On the One Hand or on the Other : Trade-Off in Timing Precision in Bimanual Musical Scale Playing. *Advances in Cognitive Psychology*, 15(3), 216-225. <https://doi.org/10.5709/acp-0271-5>
- Van Vugt, F. T., Furuya, S., Vauth, H., Jabusch, H.-C., & Altenmüller, E. (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*, 232(11), 3555-3567. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4036-4>
- Van Vugt, F. T., Jabusch, H.-C., & Altenmüller, E. (2012). Fingers Phrase Music Differently : Trial-to-Trial Variability in Piano Scale Playing and Auditory Perception Reveal Motor Chunking. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00495>
- Van Vugt, F. T., Jabusch, H.-C., & Altenmüller, E. (2013). Individuality That is Unheard of : Systematic Temporal Deviations in Scale Playing Leave an Inaudible Pianistic Fingerprint. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00134>
- Van Vugt, F. T., Treutler, K., Altenmüller, E., & Jabusch, H.-C. (2013). The influence of chronotype on making music : Circadian fluctuations in pianists' fine motor skills. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00347>
- Vaquero, L., Hartmann, K., Ripollés, P., Rojo, N., Sierpowska, J., François, C., Càmarà, E., van Vugt, F. T., Mohammadi, B., Samii, A., Münte, T. F., Rodríguez-Fornells, A., & Altenmüller, E. (2016). Structural neuroplasticity in expert pianists depends on the age of

- musical training onset. *NeuroImage*, 126, 106-119.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.008>
- Vercueil, A., Taljaard, H., & Plessis, W. du. (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*, 31(1), 129-158-158.
- Wagner, C. (1971). The influence of the tempo of playing on the rhythmic structure studied at pianists playing scales. *Medicine and Sport*, 6(Biomechanics II), 129-132.
- Wagner, C., Piontek, E., & Teckhaus, L. (1973). Piano Learning and Programed Instruction. *Journal of Research in Music Education*, 21(2), 106-122. <https://doi.org/10.2307/3344587>
- Wheat, J. S., Baltzopoulos, V., Milner, C. E., Bartlett, R. M., & Tsaopoulos, D. (2005).
 COORDINATION VARIABILITY DURING OVERGROUND, TREADMILL AND
 TREADMILL-ON-DEMAND RUNNING. *ISBS - Conference Proceedings Archive*.
<https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/1175>
- Wilson, F. (1992). Digitizing Digital Dexterity : A Novel Application for MIDI Recordings of Keyboard Performance. *Psychomusicology*, Nacogdoches, TX, 11(2), 79-95.
- Windsor, W. L., & Clarke, E. F. (1997). Expressive Timing and Dynamics in Real and Artificial Musical Performances : Using an Algorithm as an Analytical Tool. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 15(2), 127-152. <https://doi.org/10.2307/40285746>
- Woody, R. H. (2006). The Effect of Various Instructional Conditions on Expressive Music Performance. *Journal of Research in Music Education*, 54(1), 21-36.
<https://doi.org/10.1177/002242940605400103>

- Yamada, M., & Tsumura, T. (1998). Do piano lessons improve basic temporal controllability of maintaining a uniform tempo? *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 19(2), 121-131. <https://doi.org/10.1250/ast.19.121>
- Yelton, G. (2015). The Story of MIDI. *Electronic Musician*, 31(11), 36-41.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music : Auditory–motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(7), 547-558. <https://doi.org/10.1038/nrn2152>

Annexe A — Exemple de la procédure de recherche

Complétée le 17 septembre 2019

Base de données : JSTOR

1. Keywords used: “Piano Performance” AND “Consistency” – 113 results.
 - a. A quick read of the abstracts of papers with relevant titles resulted in the addition of (Clarke, 1985; Drake & Palmer, 1993; Miksza, 2011; Repp, 1996b, 1997b, 2000; Sundberg et al., 1991; Windsor & Clarke, 1997)
2. Keywords used: “Piano Performance” AND “Variability” – 100 results
 - a. Some overlap with the previous query, however many articles had interesting abstracts and were added to the bibliography: (Dixon, Goebel, & Cambouropoulos, 2006; Duke & Davis, 2006; Gabrielsson, 1999; Jacobs & Bullock, 1998; Keller, Weber, & Engel, 2011; MacKenzie, Vaneerd, Graham, Huron, & Wills, 1986; Meyer & Palmer, 2003; Mishra, 2008; Palmer, 1996; Rankin, Large, & Fink, 2009; Repp, 1999; Repp, Luke Windsor, & Desain, 2002; Stachó, 2012; Van Hedger, Hogstrom, Palmer, & Nusbaum, 2015; Van Zijl, Toiviainen, Lartillot, & Luck, 2014; Vines, Nuzzo, & Levitin, 2005).
3. Keywords are “Piano Performance” AND “Repeatability” OR “Repetition” – 150 results
 - a. A quick look at the titles revealed that none of them are relevant to this paper.
4. Using keywords “Piano Performance” AND “Predicting” OR “Predictability” – 40 results
 - a. The articles that were on topic had already been added to the bibliography.
5. Keywords used: “Repp, Bruno” (author) in uOttawa Library Catalogue
 - a. (Repp, 1994, 1995b, 1996a, 1996c, 1997a, 1997c, 1997e, 1997f, 1998a, 1998b, 1999b) were added to the bibliography.

Annexe B — Raisons d'exclusion

Bresin, R., & Battel, G. U. (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, 29(3), 211-224. <https://doi.org/10.1076/jnmr.29.3.211.3092>

Bien que l'étude comporte plusieurs performances répétées ces dernières sont influencées par la condition expérimentale. Par conséquent, il n'est pas possible de tirer des conclusions quant à la variabilité des paramètres observés.

Flückiger, M., Grosshauser, T., & Tröster, G. (2018). Influence of Piano Key Vibration Level on Players' Perception and Performance in Piano Playing. Applied Sciences, 8(12), 2697. <https://doi.org/10.3390/app8122697>

Bien que l'étude comporte plusieurs performances répétées, ces dernières sont influencées par la condition expérimentale. Par conséquent, il n'est pas possible de tirer des conclusions quant à la variabilité des paramètres observés.

Jacobs, J. P., & Bullock, D. (1998). A Two-Process Model for Control of Legato Articulation across a Wide Range of Tempos during Piano Performance. Music Perception: An Interdisciplinary Journal, 16(2), 169-199. <https://doi.org/10.2307/40285786>

Les données pertinentes de cet article proviennent de documents antérieurs. Ces derniers ont été ajoutés à la liste de références.

Paulig, J., Jabusch, H.-C., Großbach, M., Boullet, L., & Altenmüller, E. (2014). Sensory trick phenomenon improves motor control in pianists with dystonia : Prognostic value of glove-effect. Frontiers in Psychology, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01012>

Bien que l'étude comporte plusieurs performances répétées, il n'est pas possible de généraliser les données puisque l'échantillon de participants consiste de pianistes atteints de dystonie focale.

Annexe C — Organisation des documents

Données pertinentes	Type de performance	
	<i>Exercices techniques</i>	<i>Morceaux</i>
<i>Présence d'erreurs</i>	Essais avec erreurs sont habituellement retirés des analyses	Chaffin et al. (2007) Drake et Palmer (2000) Palmer & van de Sande (1993) Repp (1996b)
<i>Intensité</i>	Jabusch et al. (2004) Mackenzie et Van Eerd (1990) Repp (1995a)	Chaffin et al. (2007) Drake et Palmer (1993) Ericsson et al. (1993) Keller et al. (2011) Krampe et Ericsson (1996) Palmer (1996) Repp (1996c) Salmon & Newmark (1989) Windsor & Clarke (1997)
<i>Articulation</i>	Lipke-Perry et al. (2019) Repp (1997d) Repp (1995a)	Drake et Palmer (1993) Repp (1997d) Salmon et Newmark (1989)
<i>Pédale</i>	N/A	Heinlein (1929) Repp (1996a)
<i>Rythme</i>	Cheng et al. (2013) Jabusch et al. (2004) Jabusch et al. (2009) Jabusch et al. (2007) Kopiez et al. (2012) Lipke-Perry et al. (2019) Mackenzie et Van Eerd (1990) Van Vugt et Altenmuller (2019) Van Vugt et al. (2012) Van Vugt, Jabusch, et al. (2013) Van Vugt et al. (2014) Van Vugt, Treutler, et al. (2013) Wagner (1971) Wagner et al. (1973)	Chaffin et Logan (2006) Chaffin et al. (2007) Chaffin et al. (2006) Chaffin et al. (2005) Clarke (1985) Clarke (1982) Demos et al. (2016) Drake et Palmer (1993) Heinlein (1929) Mackenzie et al. (1986) Palmer (1996) Penel & Drake (1998) Repp (1992) Repp (1994) Repp (1995b) Repp (1997c) Repp (1997f) Repp (1999b) Salmon et Newmark (1989) Shaffer (1981) Windsor et Clarke (1997)
<i>Expertise</i>	Jabusch et al. (2009) Jabusch et al. (2007) Vaquero et al. (2016) Wagner et al. (1973)	Ericsson et al. (1993) Krampe et Ericsson (1996) Repp (1997c) Repp (1995b) Salmon et Newmark (1989)