

# ANALYSE AUTOMATIQUE DU DOIGTÉ AU PIANO

*Matthias Robine*

SCRIME – LaBRI, University of Bordeaux 1

351 cours de la Libération

F-33405 Talence cedex, France

Matthias.Robine@labri.fr

## RÉSUMÉ

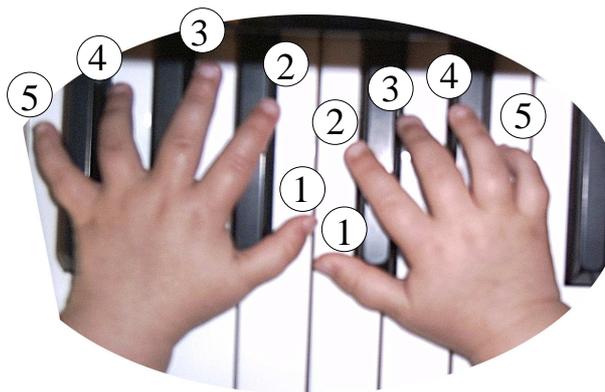
Le choix d'un doigté a une influence certaine sur le jeu au piano. S'il est généralement un compromis entre des contraintes physiques et interprétatives, la composante physique a la priorité quand il s'agit de passages musicaux très rapides et techniques. Cet article présente une méthode originale pour trouver automatiquement le doigté optimal d'une mélodie dans ce contexte. En se fondant sur des travaux de biomécanique, nous jetons également les bases d'une méthode d'analyse de la performance pour retrouver le doigté utilisé par l'interprète. Elle utilise la programmation dynamique et intègre des contraintes physiques liées aux enchaînements des doigts.

## 1. INTRODUCTION

Le doigté au piano est un sujet transverse qui concerne notamment la musicologie, la biomécanique et l'informatique. À partir d'expériences biomécaniques sur le jeu au piano, nous proposons une nouvelle méthode de doigté automatique d'une partition, ainsi qu'une méthode de reconnaissance du doigté à partir de la performance pianistique. Après une brève présentation du piano, nous soulignons dans la section 2 l'importance et l'influence du choix du doigté dans la performance pianistique. Nous exposons ensuite, section 3, les différents travaux de biomécanique qui analysent cette influence dans la performance. Nous proposons alors un algorithme pour trouver le doigté d'une mélodie (section 4) et nous montrons dans la section 5 comment retrouver le doigté utilisé par un pianiste à partir de son jeu.

## 2. LE PIANO ET SON DOIGTÉ

Le piano, dont l'histoire musicale est détaillée par exemple par Closson [1], est souvent considéré comme le roi des instruments. Pour étudier le doigté, nous nous concentrons sur son clavier, dont les évolutions historiques sont détaillées par Haury [2]. Le clavier standard du piano moderne est en général composé de 88 touches, séparées en 52 touches blanches et 36 touches noires. Le doigté consiste alors dans l'art de



**Figure 1.** Numérotation des doigts au piano. La numérotation commence par le pouce, doigté 1, pour la main droite comme pour la main gauche.

choisir la combinaison de doigts à utiliser pour jouer une série de notes sur ce clavier. Au piano, chacun des doigts peut potentiellement appuyer sur n'importe quelle touche du clavier, il n'y a pas de doigté standard pour jouer une note. La notation associe le doigté 1 au pouce de chaque main et numérote successivement les doigts en partant du pouce jusqu'à 5, comme illustré par la figure 1.

## 3. BIOMÉCANIQUE ET PIANO

D'après Parncutt [3], le doigté optimal est un compromis entre les contraintes de nature physique (structure du clavier), anatomique (structure de la main), motrice (coordination des doigts), cognitive (mémoire pour les patrons complexes) et interprétative (structure, émotion). Un bon doigté permet à l'interprète de jouer un passage le plus confortablement possible, permettant d'interpréter ce passage avec la plus grande aisance. Les pianistes utilisent les doigtés types, ceux fournis par l'éditeur de partition par exemple, essentiellement pour *déchiffrer* (jouer pour la première fois) un morceau et les modifient ensuite pour personnaliser leur interprétation.

De nombreuses études de biomécanique se sont attachées à décrire le fonctionnement des doigts, de la main et du bras du pianiste. Elles montrent que cet

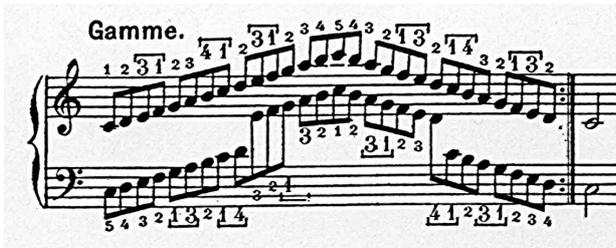


Figure 2. Gamme de Do majeur pour le piano, avec indication du doigté conventionnel (extrait de la méthode Descaves [9]).

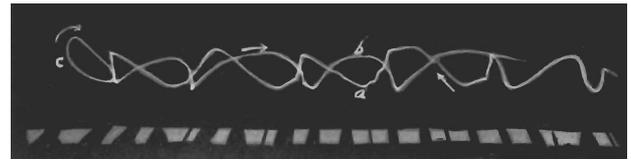
aspect physique a une influence sur le jeu instrumental, à travers le doigté notamment. Ainsi les travaux de Ortmann [4], plus récemment ceux de Wagner [5], Bejjani *et al* [6] ou Harding *et al.* [7], s'intéressent tous aux mouvements de la main et des doigts du pianiste. Les travaux de Ortmann [4] et McKenzie et VanEerd [8] montrent ainsi l'influence que peut avoir le choix d'un doigté, en analysant la performance pianistique en fonction des doigts utilisés par le pianiste. Ils utilisent notamment des exercices à base de gammes, où le doigté utilisé est conventionnel. L'exemple d'un tel doigté pour la gamme de Do majeur est donné par la figure 2.

Ortmann a photographié les trajectoires des doigts durant l'exécution des gammes, comme le montre la figure 3 : nous pouvons constater des motifs répétés dans le mouvement des doigts. McKenzie et VanEerd ont également réalisé des expériences avec des pianistes jouant des gammes à différents tempi (différentes vitesses d'exécution), pour les deux mains. Une partie de leurs résultats est illustrée par la figure 4. En fonction des doigts utilisés, et souvent lors de l'utilisation du pouce, il y a des irrégularités dans les intervalles de temps entre les notes (intervalle qui devrait être constant pour une gamme) et dans les nuances. Les déviations observées dans l'exécution d'un passage technique rapide sont caractéristiques des doigts utilisés : il y a une sorte d'empreinte de la main dans la performance.

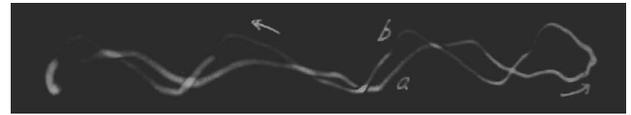
#### 4. DOIGTÉ AUTOMATIQUE

Nous discutons dans cette partie la recherche du doigté optimal pour jouer une séquence de notes donnée. Des études ont précédemment été menées par Parncutt *et al.* [10] pour le piano, dont la méthode a été raffinée par Jacobs [11], ainsi que par Sayegh [12] et Radicioni *et al.* [13, 14, 15, 16] pour la guitare.

Le modèle proposé par Parncutt *et al.* [10] prend en considération les contraintes ergonomiques rencontrées par les pianistes. Le doigté optimal est généré en deux étapes : premièrement, tous les doigtés possibles sont énumérés et deuxièmement, chaque suite de doigts est pondérée en fonction des difficultés



(a)



(b)

Figure 3. Travaux biomécaniques de Ortmann [4] sur le piano. Une lumière a été attachée au doigt d'un pianiste et les trajectoires sont photographiées. (a) Trajet du 3ème doigt de la main droite dans une gamme ascendante, puis descendante, avec un tempo allegro (4 notes par pulsation pour environ 168 pulsations par minute). Le photographe est face au pianiste. (b) Mouvement du pouce dans une gamme rapide, ascendante et descendante. Le photographe est derrière le pianiste, sur sa gauche. Nous remarquons que chaque doigt a une trajectoire propre, avec des motifs répétés dans son déplacement.

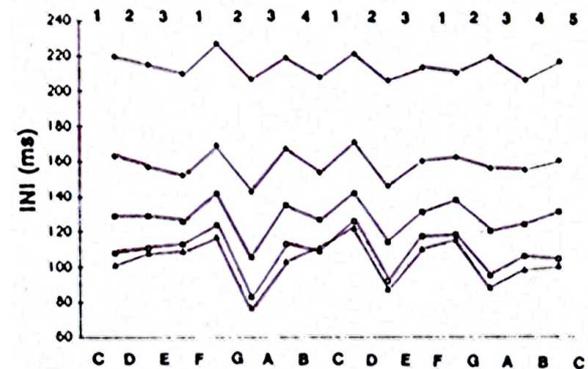


Figure 4. Travaux biomécaniques de McKenzie et VanEerd [8] sur le doigté au piano. L'intervalle moyen entre les notes, en ms, est donné en fonction du tempo et de la note, pour une gamme de Do majeur ascendante à la main droite. Le doigté est indiqué en haut et l'unité de tempo est le nombre de pulsations par minute. Les différents tempi utilisés sont : 60, 90, 120, 180 pulsations par minute et "aussi vite que possible" (afap). Les notes sont indiquées en notation américaine, avec une correspondance A-La, B-Si, C-Do, ... Nous constatons que les évolutions des différentes courbes sont proches et que le passage du pouce (enchaînement 3-1 ou 4-1) a un effet significatif sur les intervalles.

qu'elle engendre. La pondération est basée sur l'application de douze règles de bon doigté, participant chacune à une difficulté générale. Le doigté de coût minimal est alors le doigté conseillé par la méthode. L'algorithme de doigté pour la guitare proposé par Sayegh [12] utilise une représentation basée sur les graphes, avec les doigts comme sommets, reliés par des arêtes dont le poids est associé à la difficulté de la transition entre notes. Trouver le meilleur doigté est équivalent à la recherche du chemin de coût minimal dans le graphe. Radicioni *et al.* [13, 14, 15, 16] ont repris ces travaux en ajoutant notamment la caractérisation des contraintes biomécaniques à la pondération des arêtes du graphe.

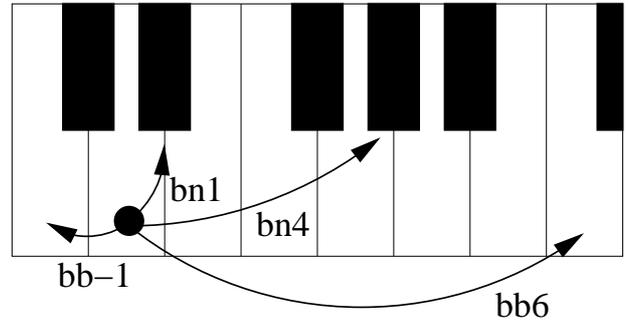
Nous proposons également une méthode de doigté automatique d'un passage musical rapide et technique, basée sur la programmation dynamique [17]. Nous excluons donc les paramètres d'expressivité du doigté, conformément aux pianistes qui choisissent leur doigté uniquement sur des critères biomécaniques quand le passage est techniquement très difficile. Il s'agit de trouver le chemin de coût minimal dans un graphe où les sommets sont des doigts, comme Sayegh [12] le propose, mais en utilisant cette fois une méthode de programmation dynamique. À l'instar de Parncutt *et al.* [10], le modèle est restreint à l'étude du doigté de la main droite, pour le fragment d'une mélodie.

#### 4.1. Transitions

Nous proposons de construire dans un premier temps la liste des transitions à effectuer successivement entre les touches du clavier à partir de la suite de notes à jouer. Nous notons pour cela les touches blanches du clavier  $b$  et les noires  $n$ . Un chiffre est associé à chaque transition, il représente le minimum du nombre de frontières de touche traversées sur le clavier entre les deux notes de la transition. Ce chiffre est positif quand l'intervalle est ascendant (vers la droite du clavier), négatif sinon. Ainsi un enchaînement (Do, Ré, Mi) amène à la création de la liste de transitions : (bb1, bb1), c'est-à-dire deux fois la transition d'une touche blanche à une autre touche blanche, avec un écart d'une touche sur le clavier. De la même façon, l'enchaînement (Do, Si bémol, La) génère la suite de transitions (bn-2, nb-1). La figure 5 illustre cette notation.

#### 4.2. Matrices de pondération

Une transition entre deux notes peut être effectuée en utilisant différentes combinaisons de doigts. Nous voulons trouver le meilleur doigté possible pour un passage rapide donné. Il faut alors convenir de ce qui rend un doigté meilleur qu'un autre. Le doigté est fortement lié à l'anatomie de l'interprète, certains enchaînements sont difficiles à réaliser, voire impossibles. Nous proposons d'utiliser des matrices



**Figure 5.** Notation pour les transitions entre les notes du clavier. Les notes blanches sont notées  $b$ , les notes noires  $n$ . L'écart entre les notes est indiqué par une valeur positive vers la droite du clavier, qui représente le minimum du nombre de frontières de touche traversées sur le clavier entre les deux notes de la transition. Ainsi  $bb6$  représente la transition d'une note blanche à une autre, avec une distance de 6 frontières traversées, soit une transition ascendante Ré-Do par exemple.

de transitions  $M_t$ , où  $t$  est une transition donnée. Les valeurs de ces matrices sont indexées sur la fréquence d'utilisation des différentes transitions dans les doigtés conventionnels, comme le doigté des gammes ou des arpèges.  $M_{bb1}(1, 2)$  est alors le coût de la transition du doigt 1 vers le doigt 2 pour une transition d'une note blanche à une autre du clavier qui la suit. En convenant qu'il est impossible de réaliser au piano des intervalles supérieurs à un intervalle de douzième (intervalle de 19 demi-tons) sans saut de main, le nombre de matrices nécessaires est alors fini et limité.

$M_{bb1}$  est ainsi la matrice de coût pour la transition d'une note blanche vers la note blanche suivante à droite du clavier :

$$M_{bb1} = \begin{pmatrix} 1000 & 1 & 2 & 10 & 100 \\ 100 & 1000 & 1 & 10 & 100 \\ 5 & 1000 & 1000 & 1 & 100 \\ 5 & 1000 & 1000 & 1000 & 1 \\ 1000 & 1000 & 1000 & 1000 & 1000 \end{pmatrix}$$

Les valeurs de  $M_{bb1}$  sont indicatives. La valeur 1000 est arbitrairement élevée et indique : "quasiment impossible". Ce coût est attribué pour la répétition d'un même doigt pour jouer les deux notes de la transition (diagonale de la matrice). Les doigtés les moins coûteux sont alors : 1-2, 2-3, 3-4 ou 4-5.

Nous avons utilisé des valeurs basées sur la connaissance des doigtés conventionnels. Il est possible d'établir d'autres contraintes, afin d'établir par exemple le meilleur doigté qui n'utilise pas le doigt 3. Pour cela, il suffit de pondérer avec une très grande valeur toutes les transitions passant par ce doigt et celui-ci ne sera pas utilisé dans le doigté optimal. La motivation de la pondération peut être conventionnelle, mais aussi individualisée, avec des poids adaptés à l'anatomie d'un interprète particulier. Les valeurs

des matrices peuvent également être calculées par apprentissage, en fonction de la fréquence des doigtés réellement utilisés par les interprètes professionnels ou les professeurs. Le doigté optimal dépend donc des contraintes choisies pour pondérer les matrices.

### 4.3. Doigté dynamique

Nous proposons d'utiliser la programmation dynamique présentée par Belmann [17] pour déduire le doigté optimal pour jouer une mélodie (pas de notes simultanées). La programmation dynamique permet de restreindre les possibilités de doigté à chaque étape de la méthode et d'éviter ainsi une quantité exponentielle de possibilités non optimales. Cela permet de trouver le doigté dont le coût est minimal, en fonction des coûts élémentaires de chaque transition entre deux notes.

Le coût d'un doigté, c'est la combinaison des coûts élémentaires de chaque transition traversée. Le coût minimal dépend alors de la fonction de combinaison choisie. Nous avons dans un premier temps utilisé la fonction *somme* : le coût d'un chemin est la somme des coûts élémentaires et le doigté optimal est celui dont la somme des coûts est la plus faible. Mais nous pouvons aussi bien choisir une autre fonction. La fonction *maximum* permet, par exemple, d'éviter un doigté dont toutes les transitions sont très faciles, mais avec une transition presque impossible à réaliser au milieu. Le doigté optimal est dans ce cas celui dont le maximum des coûts des transitions traversées est le plus faible : c'est une fonction *min-max*.

Nous construisons le graphe dont les sommets sont les numéros des doigts et dont les arêtes sont les transitions pondérées. Une chaîne intéressante du graphe est une suite de doigts et de transitions telles que la série de notes voulue puisse être jouée. Voici la méthode proposée pour la construction du graphe et pour la détermination du doigté optimal :

1. Démarrer la construction du graphe avec pour sommets origines 5 numéros de doigts distincts, doigtés possibles pour la première note.
2. Tant qu'il reste des transitions à effectuer, faire :
  - (a) Chaque sommet d'arrivée est relié par des arêtes à 5 nouveaux sommets, doigtés possibles pour la note suivante.
  - (b) Les nouvelles arêtes de transition sont pondérées en fonction de la transition à effectuer. Le coût de cette transition est estimé en fonction du doigt d'origine et du doigt d'arrivée. Ainsi, pour une transition  $bb1$  du doigt 2 au doigt 3, le coût de la transition est donné par  $M_{bb1}(2, 3)$ .
  - (c) Ne conserver pour chaque sommet d'arrivée que le chemin de coût minimal en provenance des sommets origines. Il n'y a plus que cinq chemins possibles.

3. Il y a 5 chemins possibles des sommets origines aux sommets d'arrivée. Ils peuvent être départagés en imposant le doigt utilisé pour la note de début ou la note de fin, ou bien en choisissant finalement le chemin dont le coût est minimal. C'est le doigté optimal.

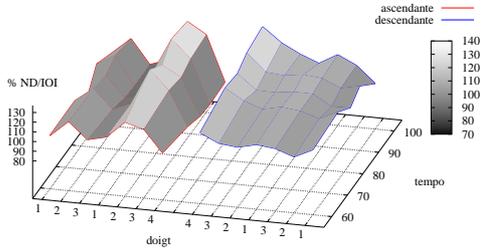
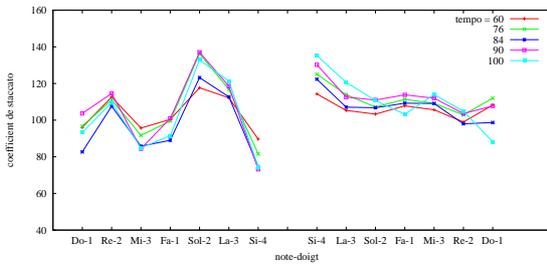
## 5. ANALYSE DE LA PERFORMANCE

Il est intéressant de pouvoir retrouver le doigté utilisé par un pianiste. Cela offre par exemple des alternatives de doigté aux autres musiciens pour leur propre interprétation. Nous proposons pour cela une méthode fondée sur l'analyse du jeu instrumental.

### 5.1. Protocole d'enregistrement et analyse

Nous avons reproduit une expérience menée par MacKenzie et VanEerd [8], en demandant à un pianiste de jouer des gammes avec la main droite, sans expressivité, à des tempi différents. Nous avons analysé les déviations temporelles observées entre la performance musicale et le rythme théorique ainsi que les écarts d'amplitude. Le clavier électrique utilisé disposait d'un *touché dynamique* (reproduction de la résistance des touches d'un piano acoustique) et d'une interface MIDI. Le pianiste a joué la gamme de Do majeur avec la main droite uniquement, sur 4 octaves ascendantes et 4 octaves descendantes, en suivant les doigtés conventionnels indiqués par la figure 2. La gamme de Do majeur a été jouée 5 fois par indication de tempo, pour 5 tempi différents, avec 4 notes jouées pour 60, 72, 84, 90 et 100 pulsations par minute. Le tempo a été donné avec un métronome, avec deux indications par pulsation (battue à la croche). Il y a eu 20 octaves ascendantes enregistrées par indication de tempo et 20 autres descendantes. Nous avons établi des moyennes par octave ascendante, par octave descendante et par tempo à partir de ces 20 octaves.

Nous nous sommes intéressés à deux paramètres en particulier, le coefficient de *staccato* d'une part et la vélocité (en rapport avec l'amplitude) d'autre part. Le coefficient de *staccato* est le rapport entre la durée d'une note et l'intervalle de temps entre le début de cette note et le début de la suivante. Les résultats concernant ce paramètre sont donnés en fonction des doigts utilisés et du tempo demandé par la figure 6. Nous constatons que les courbes de l'évolution octave par octave de ce coefficient en fonction du tempo sont très proches. Comme pour les travaux de McKenzie et VanEerd, illustrés par la figure 4, nous pouvons observer que le passage du pouce dans la gamme influe directement sur le coefficient de *staccato*, qui diminue pour la note jouée avant celle utilisant le doigté 1. Cela est dû à la préparation du passage du pouce, qui oblige à lever le doigt précédant le pouce assez tôt, pour permettre

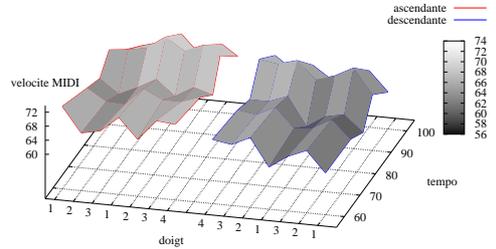
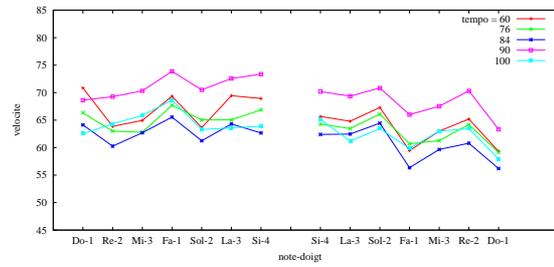


**Figure 6.** Coefficient de staccato pour une gamme de Do majeur jouée au piano à la main droite. Le coefficient est le rapport en pourcentage entre la durée de la note (ND) indiquée en abscisse et l'intervalle de temps séparant le début de cette note et la suivante (IOI). En haut, les résultats sont visualisés en 2 dimensions et en bas, en 3 dimensions. Les courbes de gauche indiquent les résultats par octave de la partie ascendante de la gamme et celles de droite la partie descendante. Nous remarquons une baisse des valeurs du coefficient avant le passage du pouce (avant un doigté 1).

à celui-ci d'appuyer sur la touche du clavier au bon moment. Le deuxième paramètre observé est la vitesse, en fonction des doigts utilisés et en fonction du tempo. Les résultats de cette analyse sont présentés par la figure 7. Dans la gamme ascendante, l'utilisation du pouce est marquée par une augmentation de la vitesse, alors que c'est l'effet inverse dans la partie descendante de la gamme. Nous retrouvons alors une empreinte physico-technique de la main de l'interprète dans la performance : empreinte physique, car elle est liée aux contraintes biomécaniques de la main, et empreinte technique, car un interprète atténue ces contraintes physiques par sa technique et son entraînement.

## 5.2. Reconnaissance du doigté

À partir des observations précédentes, nous proposons une méthode pour reconnaître le doigté utilisé dans une performance pianistique, pour des passages rapides et techniques. Cette méthode utilise la programmation dynamique et s'appuie sur l'analyse du coefficient de *staccato* et de la vitesse des notes. Comme dans la section 4.3, il s'agit de construire un graphe de doigté, avec des transitions comme arêtes et des numéros de doigts comme sommets. Les transitions sont déduites de la série de notes jouée par



**Figure 7.** Valeurs de vitesse MIDI pour une gamme de Do majeur jouée au piano à la main droite. En haut, les résultats sont visualisés en 2 dimensions et en bas, en 3 dimensions. Les courbes de gauche indiquent les résultats par octave de la partie ascendante de la gamme et celles de droite la partie descendante. Nous remarquons une augmentation de la vitesse pour les notes jouées avec le doigté 1 dans la partie ascendante de la gamme et l'effet inverse dans la partie descendante.

l'interprète. Il faut commencer par générer les doigts possibles pour la séquence des deux premières notes du passage. Un filtrage physique peut alors être effectué, excluant les transitions impossibles à réaliser (nous sommes dans un contexte d'enchaînement rapide de notes) : un enchaînement Do-Ré (bb1) ne peut pas être joué en utilisant le doigté 5-1 par exemple.

Nous proposons d'utiliser ensuite une formule de corrélation pour pondérer les transitions en fonction des similitudes entre les valeurs analysées et des valeurs acquises par apprentissage. Cette formule compare les valeurs du coefficient de *staccato* et de vitesse observées dans la performance et celles d'une base de données obtenue par apprentissage. Comme nous avons pu l'observer dans la section précédente, ces deux paramètres varient en fonction des doigts utilisés lors de la transition. Comparer des valeurs obtenues par apprentissage et les valeurs observées peut nous servir à reconnaître la séquence de doigts utilisée pour deux notes d'une transition. Nous pouvons ainsi nous baser sur la différence de valeurs entre le coefficient de *staccato* observé dans la performance et le coefficient théorique. Pour ne pas tenir compte du signe, nous proposons d'utiliser le carré de la différence. La différence de vitesse entre les deux doigts de la transition est également un paramètre important. Nous proposons de diminuer la valeur de la corrélation, en la multipliant par un co-

efficient  $\alpha < 1$ , si la différence de vitesse entre les deux notes de la transition est du même signe que celle attendue, et de la multiplier par un coefficient  $\beta > 1$  sinon. La formule de corrélation  $C_t$  que nous proposons d'utiliser, avec  $t$  une transition donnée, peut alors s'exprimer ainsi :

$$C_t(d_1, d_2) = v_t(d_1, d_2) \cdot (cs - cs_t(d_1, d_2))^2 \quad (1)$$

où  $t$  dénote la transition,  $cs$  le coefficient de *staccato* analysé,  $cs_t(d_1, d_2)$  le coefficient de *staccato* enregistré pour la transition  $t$  du doigt  $d_1$  au doigt  $d_2$  et :

$$v_t(d_1, d_2) = \begin{cases} \alpha & \text{si } dv_t(d_1, d_2) \cdot dv \geq 0 \\ \beta & \text{si } dv_t(d_1, d_2) \cdot dv < 0 \end{cases} \quad (2)$$

avec  $\alpha$  et  $\beta$  des constantes telles que  $\alpha < 1$  et  $\beta > 1$ ,  $dv_t(d_1, d_2)$  la différence de vitesse enregistrée entre les doigts  $d_1$  et  $d_2$  et  $dv$  la différence analysée.

Cette formule de corrélation nous permet d'attribuer un poids à chaque arête du graphe. Cette étape dépend fortement de la formule de corrélation utilisée. La programmation dynamique est alors employée, comme dans la section 4.3, pour restreindre les possibilités de doigté à chaque étape. Cela permet de ne conserver que le meilleur chemin pour chaque sommet d'arrivée, en fonction des pondérations traversées précédemment. La même méthode est appliquée pour chaque transition, jusqu'à la dernière note jouée. À la fin de la méthode, le doigté proposé est le chemin optimal dans le graphe. Une étape de la méthode est illustrée par la figure 8.

### 5.3. Conclusion et perspectives

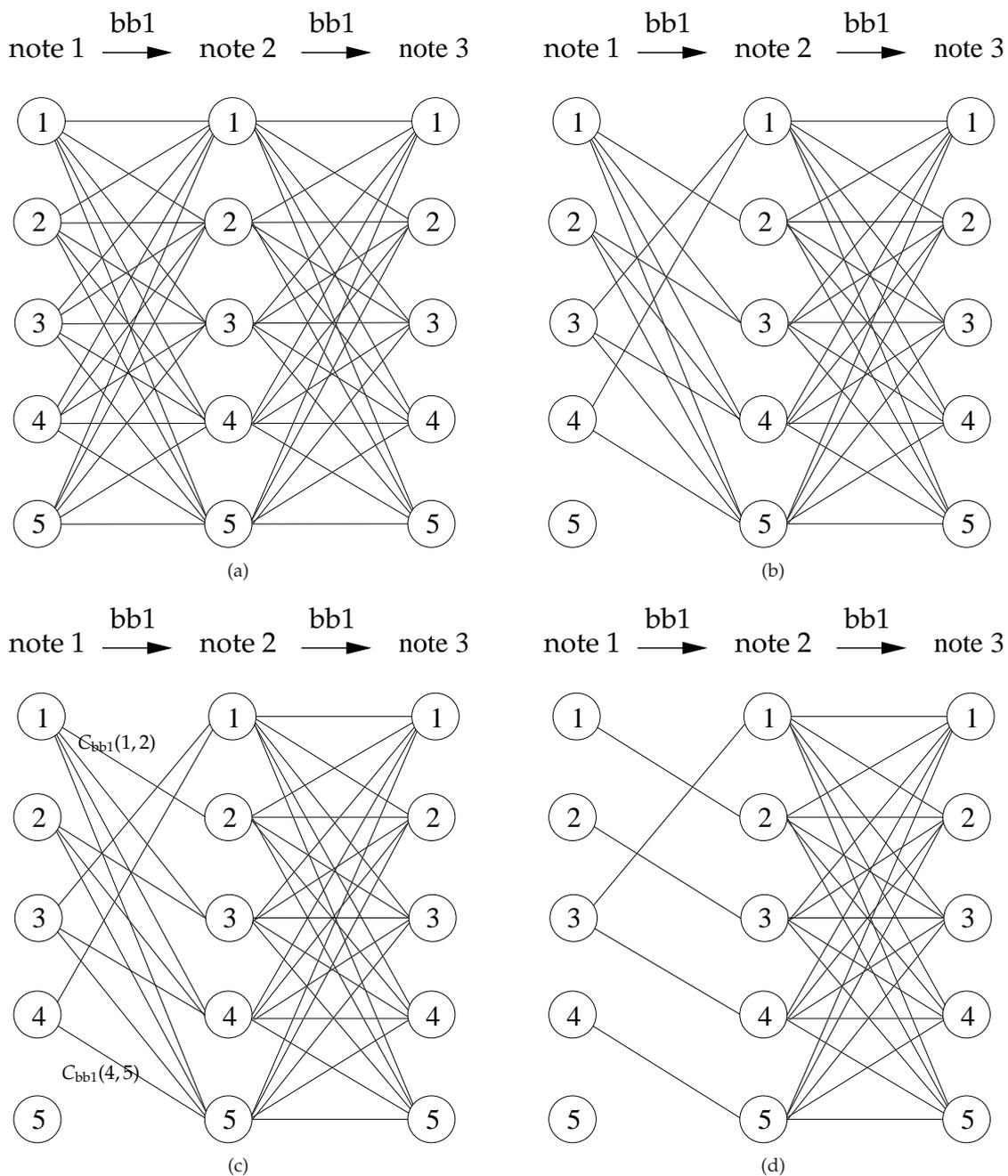
À partir d'études menées dans des domaines différents tels la biomécanique, la musicologie ou l'informatique, nous avons proposé de nouvelles méthodes pour le doigté automatique et la reconnaissance du doigté à partir de la performance pianistique. Nous projetons maintenant de les évaluer : les résultats de la méthode sur le doigté automatique doivent être comparés avec des doigtés conventionnels sur des pièces variées. Nous envisageons aussi de travailler avec différents interprètes pour tester notre méthode de reconnaissance de doigté sur des exercices techniques, et sur des pièces instrumentales.

Nous avons présenté une formule de corrélation qui permet d'attribuer un coût à une transition entre deux notes, et de choisir ainsi le doigté optimal pour un passage musical. Elle est pour le moment assez naïve, et pourrait être affinée en tenant compte par exemple des écarts types, en plus de la moyenne, issus des données enregistrées par apprentissage.

Stamatatos et Widmer [18] proposent de caractériser les interprètes, pour pouvoir les identifier à travers leur performance. L'empreinte physico-technique mise en évidence dans cet article est assurément un des éléments à prendre en compte pour reconnaître un interprète à partir de son jeu.

## 6. REFERENCES

- [1] Ernest Closson, *Histoire du Piano*, Éditions Universitaires, Bruxelles, 1944.
- [2] Jean Hauray, *Les Nouveaux Gestes de la Musique*, chapitre Petite Histoire Illustrée de l'Interface Clavier, pp. 93–110, Cultures Musicales. Éditions Parenthèses, 1999.
- [3] Richard Parncutt and Malcolm Troup, *Science and Psychology of Music Performance : Creative Strategies for Teaching and Learning*, chapitre Piano, pp. 285–302, R. Parncutt and G. E. McPherson, Oxford University Press, 2002.
- [4] Otto Ortmann, *The Physiological Mechanics of Piano Technique*, Dutton, 1962.
- [5] Christoph Wagner, "The pianist's hand : Anthropometry and biomechanics," *Ergonomics*, vol. 31, no. 1, pp. 97–131, 1988.
- [6] Fadi J. Bejjani, Lawrence Ferrara, Naiming Xu, Concetta M. Tomaino, Lazaros Pavlidis, Junli Wu, and Jan Dommerholt, "Comparison of three piano techniques as an implementation of a proposed experimental design," *Medical Problems of Performing Artists*, vol. 4, no. 3, pp. 109, 1989.
- [7] David C. Harding, Kenneth D. Brandt, and Ben M. Hillberry, "Finger joint force minimization in pianists using optimization techniques," *Journal of Biomechanics*, vol. 26, no. 12, pp. 1403–1412, 1993.
- [8] Christine L. Mac Kenzie and Dwayne VanEerd, "Rhythmic precision in piano scales : Motor psychophysics and motor programming," in *Proceedings of the Thirteenth Symposium on Attention and Performance*, M. Jeannerod, Ed., 1990, pp. 375–408, Hillsdale, Lawrence Erlbaum Associates.
- [9] Lucette Descaves, *Technique des Gammes, Arpèges, Tenues et Accords pour le Piano*, vol. 1 of *Crescendo*, Gérard Billaudot, 1950.
- [10] Richard Parncutt, John A. Sloboda, Eric F. Clarke, Matti Raekallio, and Peter Desain, "An ergonomic model of keyboard fingering for melodic fragments," *Music Perception*, vol. 14, no. 4, pp. 341–382, 1997.
- [11] J. Pieter Jacobs, "Refinements to the ergonomic model for keyboard fingering of Parncutt, Sloboda, Clarke, Raekallio, and Desain," *Music Perception*, vol. 18, no. 4, pp. 505–511, 2001.
- [12] Samir I. Sayegh, "Fingering for string instrument with the optimum path paradigm," *Computer Music Journal*, vol. 13, no. 6, pp. 76–84, 1989.
- [13] Daniele Radicioni, Luca Anselma, and Vincenzo Lombardo, "An algorithm to compute fingering for string instruments," in *Proceedings of the National Congress of the Associazione Italiana di Scienze Cognitive*, Ivrea, Italy, 2004.
- [14] Daniele Radicioni, Luca Anselma, and Vincenzo Lombardo, "A segmentation-based prototype to compute string instruments fingering," in *Proceedings of the Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM)*, Graz, Austria, 2004.
- [15] Daniele Radicioni and Vincenzo Lombardo, "Computational model of chord fingering," in *Proceedings of the Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Stresa, Italy, 2005, pp. 1791–1796.
- [16] Daniele Radicioni and Vincenzo Lombardo, "Guitar fingering for music performance," in *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 527–530.
- [17] Richard E. Bellman, *Dynamic Programming*, Princeton University Press, New Jersey, 1957.
- [18] Efstathios Stamatatos and Gerhard Widmer, "Music performer recognition using an ensemble of simple classifiers," in *Proceedings of the European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, 2002, pp. 335–339.



**Figure 8.** Méthode de reconnaissance de doigté à partir de la performance. (a) Doigté à trouver pour une séquence de 3 notes. Nous devons d'abord trouver le doigté utilisé pour l'intervalle bb1 entre les 2 premières notes. (b) Les transitions impossibles peuvent être supprimées pour le premier intervalle bb1 (d'après des éléments de biomécanique et / ou de pédagogie du piano). (c) Un poids est attribué à chaque arête par corrélation avec une base de données construite par apprentissage. Pour cet exemple, nous n'avons indiqué que 2 valeurs de corrélation par souci de clarté, entre les doigts 1 et 2 et entre 4 et 5. (d) Résultat du processus de programmation dynamique : si la deuxième note est jouée avec le 4ème doigt, c'est probablement que la première était jouée avec le 3ème. Le même procédé est maintenant appliqué pour la transition de la note 2 à 3 et jusqu'à la dernière note.