

## Turing *ex tempore* : un ordinateur peut-il improviser de la musique ?\*

Pierre Saint-Germier

École Normale Supérieure de Lyon

Institut des Sciences Cognitives Marc Jeannerod

*Malgré l'indulgence de l'éditeur de ce volume, je n'ai pas été en mesure de rendre ma contribution à temps pour la publication. En lieu et place de l'article, inexistant hélas, que j'avais promis, je propose à la sagacité du lecteur la transcription d'une discussion sur la musique qui est apparue de façon impromptue lors d'un test de Turing mené par une ancienne collègue philosophe, aujourd'hui reconvertie dans l'informatique et qui mène des recherches en intelligence artificielle pour le compte d'une grande multinationale (dont je ne peux ici révéler le nom). Connaissant mon intérêt philosophique pour l'improvisation musicale, cette amie de longue date a eu la gentillesse de me faire parvenir, par e-mail, le script de cette conversation, augmenté de quelques notes de bas de page qu'elle a fort aimablement ajoutées pour mon information personnelle. Je me permets de les reproduire ici en espérant qu'elles intéressent le lecteur.*

*PS : Elle n'a pas précisé qui, de A ou de B, est l'humain et qui est l'ordinateur. J'ignore également si le juge est parvenu à identifier correctement la machine.*

*A* : A votre avis, peut-on dire qu'un ordinateur pense ?

*B* : N'essayez pas de me piéger, s'il vous plaît. Je sais bien que nous sommes en train de faire un test de Turing<sup>1</sup>, et que tous les moyens sont bons pour faire croire au juge que c'est moi l'ordinateur et vous l'humain mais, de grâce, pourriez-vous éviter d'aborder la question que nous sommes en train de résoudre à l'aide de ce test. Même si je suis humain, je n'aime pas les sophismes, et je déteste par dessus-tout les pétitions de principe.

*A* : Je vois ici nulle *petitio principii*, cher ami. Une petite mise en abîme, tout au plus. Mais faisons comme vous voulez et laissons de côté la pensée des ordinateurs, qui manifestement vous angoisse. Je propose que nous parlions de musique à la place. Vous aimez Mozart ?

*B* : Difficile de ne pas reconnaître le génie lorsqu'il éclate avec autant de brillance, mais je dois dire que mes amours musicales se portent plutôt du côté du *free jazz* ces temps-ci. J'ai beaucoup d'admiration pour ces compositeurs qui passent des semaines à écrire des symphonies, mais la spontanéité d'une musique improvisée de bout en bout, sans aucune partition ni thème de départ, me touche de façon particulière<sup>2</sup>. Mais il ne s'agit que de moi. *De gustibus non est disputandum*.

*A* : Sans doute. Mais ne croyez pas que je n'ai pas remarqué votre tentative subtile d'influencer le juge en faisant l'éloge de l'improvisation. L'improvisation, au moins pour le *vulgum pecus*, semble bien être le propre de l'humain, et il paraît difficile d'imaginer qu'un ordinateur puisse improviser de la musique.

*B* : Les ordinateurs, décidément, sont une obsession chez vous. Êtes-vous sûr de ne pas en être un ? Plus sérieusement, je pense que vous sous-estimez l'intelligence et la culture de notre juge. Pour quelles raisons, selon vous, devrait-il penser qu'un ordinateur est incapable d'improviser de la musique ? Je peux citer au moins trois exemples de programmes informatiques capables

---

\* Il s'agit de la pénultième version d'un texte à paraître dans Clément Canonne éd., *Perspectives philosophiques sur les musiques actuelles*, Sampzon, Delatour. Veuillez citer ou faire référence la version publiée.

1 Le test ainsi nommé d'après son concepteur Alan Turing vise à déterminer si un ordinateur possède une intelligence. L'approche de Turing consiste à envisager cette question comme une question empirique, susceptible d'être décidée par un certain protocole expérimental. Ce protocole prend la forme d'un jeu, appelé le jeu de l'imitation, réunissant deux joueurs A et B, parmi lesquels figurent un humain et un ordinateur, ainsi qu'un juge. A et B mènent une conversation par écrit. Le juge doit déterminer qui de A ou de B est l'ordinateur. Turing propose que si l'ordinateur parvient à tromper le juge, alors nous pouvons légitimement lui attribuer une intelligence. Voir Turing (1950) pour la proposition originale et (Moor, 2003) pour un recueil de discussions critiques.

2 B décrit ce qu'il est convenu d'appeler « improvisation libre » et qui s'oppose à l'improvisation idiomatique, où l'improvisateur doit respecter les contraintes d'un idiome musical prédéterminé (le langage de la musique baroque, du jazz, des *maqams turcs*, etc.). Pour un tour d'horizon des différentes formes d'improvisation, idiomatiques ou libres, voir (Bailey, 2004).

d'improviser : *Omax*, développé à l'IRCAM par Gérard Assayag, Georges Bloch et Marc Chemillier<sup>3</sup>, *Voyager* de George Lewis (également tromboniste de *free-jazz*, et professeur à l'université Columbia de New York)<sup>4</sup>, et les programmes *Continuator* et *Virtuoso* conçus par François Pachet<sup>5</sup> au Laboratoire Sony CSL. Qu'avez-vous à répondre à cela<sup>6</sup> ?

*A* : Je prend note de votre érudition. Mais je vois pour ma part une raison fondamentale, philosophique pour ainsi dire, de rejeter *a priori* l'idée qu'un ordinateur puisse improviser. Il suffit pour cela de considérer ce que fait un ordinateur, au niveau le plus fondamental, à savoir exécuter des algorithmes.

*B* : Question de clarification : pouvez-vous me rappeler ce que vous entendez par « algorithme » ?

*A* : Comme si vous ignoriez de quoi il s'agit. Mais cela ne peut pas faire de mal de s'entendre sur les mots, avant de commencer à débattre. Par « algorithme » j'entends une procédure *P* conduisant à un résultat déterminé qui remplisse les conditions suivantes : (i) la procédure *P* est décrite à l'aide d'un nombre fini d'instructions, chaque instruction étant elle-même exprimée à l'aide d'un nombre fini de symboles, (ii) *P* donnera à coup sûr, si elle est exécutée correctement, le résultat visé, après un nombre fini d'étapes ; (iii) *P* peut, en pratique ou *au moins en principe*, être mise en œuvre par un être humain, muni de papier et de crayon, ou d'instruments adéquats au résultat visé, sans l'aide d'aucune machine et (iv) l'exécution de *P* ne demande aucune créativité particulière à celui qui l'exécute, mais seulement la capacité à suivre rigoureusement, c'est-à-dire, aveuglément les instructions qui lui sont données (ce qui fait que la procédure peut également en principe sinon en pratique être exécutée par une machine). Sommes-nous d'accord ?

*B* : Si je vous comprends bien, cela suppose que des instructions soient présentées dans une notation exacte, par exemple une séquence de symboles désignant des notes de musiques, de façon à pouvoir être exécutées bêtement, par un pianiste dénué de tout sens de l'interprétation, ou éventuellement par un piano mécanique. Je ferais simplement remarquer que la quatrième condition fait appel à la notion relativement vague de « créativité » qui reste mal définie.

*A* : Et vous avez parfaitement raison. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la notion d'algorithme reste une notion informelle, ce qui n'a pas empêché les pères fondateurs de l'informatique d'en donner une définition mathématique<sup>7</sup>. Mais vous mettez le doigt sur un point essentiel. Les

---

3 Le programme *Omax* est capable d'apprendre un idiome musical et d'improviser dans cet idiome. Cet apprentissage repose sur une modélisation du style considéré à base de chaînes de Markov. Cela suppose, en simplifiant grossièrement, que l'improvisation est un processus qui avance pas à pas. Les détails techniques de cette modélisation sont décrits dans (Assayag, Dubnov, 2004). Pour une présentation plus générale du projet, accompagnée d'exemples, voir la page web <http://repmus.ircam.fr/omax/home>. Les genres musicaux dans lesquels le programme a été utilisé, aussi bien en laboratoire qu'en situation de concert, sont principalement le jazz et les musiques improvisées issues du jazz. Le programme *Improtek*, récemment développé par Marc Chemillier et Jérôme Nika, propose un prolongement du logiciel *Omax* visant à capturer plus précisément certains traits idiomatiques, comme l'harmonie, propre à certains genres musicaux tels que le jazz ou certaines musiques traditionnelles. Voir (Nika et Chemillier, 2012) et <http://improtekjazz.org/index.html>.

4 George Lewis a publié en 1993 un disque intitulé *Voyager* (Avant, 1993) contenant une série de dialogues improvisés entre le programme informatique qu'il a conçu et lui-même, en tant que tromboniste (ou, sur quelques pistes, le saxophoniste Roscoe Mitchell). L'improvisation musicale est ici clairement dans la tradition de l'improvisation libre, telle qu'elle s'est développée dans la filiation du *free jazz* afro-américain (Lewis, ). Le programme ne cherche pas spécialement à apprendre le style de l'improvisation humaine pour pouvoir le « suivre », mais vise à proposer un discours improvisé original, en réponse à ce que propose le partenaire humain. Ce travail est également documenté sur le disque *Endless Shout* (Tzadik, ) et dans l'article (Lewis, 2000).

5 Le programme *Continuator* fonctionne globalement sur le même principe markovien qu'*Omax*, même si les détails algorithmiques diffèrent. Voir (Pachet, 2006) et la page web <http://www.francoispachet.fr/continuator/continuator.htm> pour une présentation accompagnée d'exemples. *Virtuoso* est de son côté un programme de génération de chorus qui vise rien de moins que la virtuosité et repose une approche partiellement markovienne, augmentée de principes de transformations formelles qui permettent au programme de construire des improvisations au niveau de la phrase, et pas seulement en choisissant les notes les unes après les autres. Voir (Pachet, 2012) et <http://www.francoispachet.fr/virtuoso/virtuoso.html>.

6 Outre les exemples cités ci-dessus, on pourra se reporter à (Dean, 2009) pour une appréciation plus spéculatives des possibilités offertes par l'informatique musicale pour l'improvisation.

7 Il est ici fait allusion au travail d'analyse conceptuelle qui au milieu des années 1930 a débouché sur la thèse dite de Church-Turing. Cette thèse consiste à identifier la notion générale et informelle d'algorithme à une autre notion définie avec toute la précision que requièrent les mathématiques. Church (1936) a proposé celle de lambda-

ordinateurs sont certes capables de grandes prouesses cognitives, mais sont fondamentalement des êtres stupides et donc ennuyeux (sauf votre respect, bien entendu). Ce qui m'amène assez naturellement à mon argument philosophique : les ordinateurs ne font qu'exécuter des algorithmes ; l'improvisation est précisément le contraire de l'exécution d'un algorithme, *igitur* aucun ordinateur ne pourra jamais improviser, quoi qu'en disent tous les messieurs que vous avez mentionnés.

*B* : Je suis toujours éberlué par l'arrogance avec laquelle les philosophes s'évertuent à contredire les faits à l'aide d'arguments *a priori*, surtout quand leurs prémisses sont insuffisamment justifiées.

Prenez par exemple la seconde prémisse de votre argument. Qu'est-ce qui vous permet de dire que l'improvisation entretient une relation de « contrariété » avec l'exécution d'un algorithme ? Je crois que vous nous devez, *a minima*, une définition de l'improvisation pour justifier cette affirmation.

*A* : L'improvisation est, de par sa nature, une chose fuyante, notoirement difficile à saisir conceptuellement<sup>8</sup>. Conscient de la finitude de mes capacités humaines, je doute de pouvoir en fournir une définition véritablement adéquate. Mais je peux au moins m'efforcer d'en donner une description générale s'appliquant au moins dans ses grandes lignes à toutes les choses que nous avons envie d'appeler « improvisations ». Il me semble qu'on peut dire, au moins en première approximation, qu'une action X est improvisée si et seulement s'il n'existe aucun plan dont X soit l'exécution. Par exemple, un discours prononcé oralement, mais préalablement composé à l'écrit et lu, ou même mémorisé et récité par cœur n'est pas improvisé. Au contraire, si on organise une *surprise party* pour mon anniversaire et me somme de prononcer un discours, je ne peux que l'improviser (à moins d'avoir anticipé la chose et d'avoir secrètement préparé quelque chose, mais nous excluons ce cas de figure).

*B* : Dans les grandes lignes, tout cela me paraît raisonnable. Mais le diable, comme toujours, est dans les détails. Pour que cette définition fonctionne, il faut que vous nous disiez (a) ce qu'est un « plan », (b) à quelles conditions un plan peut être dit « pré-exister » et (c) ce que c'est qu'exécuter un plan.

*A* : Au risque de vous ennuyer avec des définitions pompeuses, je dirais qu'un plan est la représentation d'une action dirigée vers le futur et suffisamment détaillée pour pouvoir donner lieu à une exécution. Cette représentation peut être un objet externe (un texte dans le cas du discours, une partition dans le cas de la musique) ou une représentation mentale (la mémorisation d'un texte d'un morceau de musique dans une partition intérieure). L'existence (ou la pré-existence) d'un plan se ramène à l'existence (ou la pré-existence) de ce genre de représentation. Pour qu'une représentation existe, il faut qu'il existe un véhicule (l'objet qui a pour fonction de représenter, une feuille de papier noircie de symboles divers et variés, par exemple) et une règle sémantique qui lie ce véhicule représentationnel à l'objet représenté. Le véhicule est généralement un objet physique lorsqu'il s'agit d'une représentation externe, ou d'un objet mental s'il s'agit d'une représentation interne. Bien sûr le matérialiste qui sommeille-en vous m'objectera que cet objet mental est aussi un objet physique.

*B* : Vous venez de le réveiller. Mais je ne pense pas que notre question nécessite de régler le *mind-body problem*, du moins pas maintenant. Pour reprendre le fil de notre discussion, l'existence d'un plan se ramène, si je comprends bien, à l'existence d'un véhicule et d'une règle. Une partition et une convention d'interprétation, par exemple. Si la partition, c'est-à-dire l'objet physique fait d'encre et de papier, existe sans règle sémantique, alors nous ne pouvons pas dire qu'une représentation existe, pas plus que si nous avons une règle sémantique sans véhicule représentationnel.

*A* : Je suis heureux de voir que nous nous comprenons. L'exécution d'un plan P pourra alors se définir comme une action intentionnellement et causalement guidée par P.

---

calculabilité, Turing (1936) celle de calculabilité par un certain type machines, nommées « machine de Turing » en son honneur. Les deux notions techniques sont en réalité équivalentes et ont servi de base au développement de l'informatique. Mais l'équivalence entre ces deux notions techniques et la notion initiale d'algorithme est une thèse, qui doit être justifiée par des arguments et dont la vérité n'est pas la simple conséquence logique des définitions de départ. La validité de cette thèse semblait relativement claire à Church, Turing et leur contemporains, mais elle est aujourd'hui de nouveau discutée, notamment sous la pression du développement de l'informatique quantique et de nouveaux modèles de calculs. Voir à ce sujet, par exemple, (Syropoulos, 2008).

8 Pour une analyse du concept d'improvisation, voir (Alperson, 1984). Alperson (2010) propose également une « topographie » conceptuelle de l'improvisation.

*B* : Oui, mais il y a des cas où nous ne faisons pas ce qui est prévu. Des fausses notes ont ruiné des interprétations de sonates de Prokofiev qui étaient pourtant bien parties. Si j'applique rigoureusement votre définition, dois-je en conclure que l'interprétation effectivement donnée n'était pas l'exécution d'un plan et donc qu'elle était improvisée ? Ce n'est sans doute pas ce que vous voulez dire.

*A* : Bien évidemment que non. Si vous étiez plus attentif à la formulation que j'ai donnée de ma définition, vous auriez vu que j'ai simplement requis que l'exécution soit « guidée » par le plan (la partition dans le cas que vous mentionnez), mais pas qu'elle lui corresponde en tout point. Il suffit, pour parler comme le vulgaire, que votre pianiste ait eu la « volonté » ou « l'intention » d'exécuter ladite sonate, même s'il n'y est pas complètement parvenu.

*B* : Merci pour ces précisions. Je crois que je comprends mieux le détail de votre argument de principe contre l'improvisation des machines, à présent : il y a incompatibilité entre improviser et exécuter un algorithme parce qu'un algorithme, dans un ordinateur, est représenté sous la forme d'un programme informatique dont le comportement de l'ordinateur est l'exécution, au sens précis où vous avez défini ces termes. Il existe des règles sémantiques qui associent certains symboles du programme à des événements musicaux. Donc nous avons un plan pré-existant. Et exécuter un algorithme, c'est exécuter un plan, ce qui, par définition, exclut l'improvisation. Donc aucune entité qui ne fait qu'exécuter des algorithmes, comme un ordinateur, n'est pas capable d'improviser. Est-ce bien cela ?

*A* : Votre perspicacité m'impressionne. Dois-je en conclure que nous sommes d'accord et que vous admettez à présent que les programmes que vous citiez en exemple sont certes des bijoux d'ingénierie, mais ne sauraient usurper le titre « d'improvisateurs » ?

*B* : Je crains que vous n'alliez plus vite que la musique. Il vous faudra encore un peu de travail pour me convaincre. Vous pourriez commencer par abandonner votre point de vue « philosophique » et mettre les mains dans le cambouis. Plutôt que de dissenter *in abstracto* sur la notion d'algorithme, je préfère que nous regardions de plus près comment fonctionnent les programmes informatiques en question. George Lewis, l'auteur de *Voyager*, a eu l'amabilité de nous livrer quelques détails (je cite de mémoire) :

« Le programme qui se produit sur cet enregistrement considère au moins 30 paramètres musicaux distincts, lorsqu'il reçoit un signal entrant et produit un signal sortant. L'information entrante est passée au crible d'un certain nombre de processus analytiques qui déposent leurs résultats dans un stock de variables qui représentent l'état de l'information entrante à un instant *t*. Le volume, la durée, l'octave, le registre, l'ambitus des intervalles, les hauteurs utilisées, l'amplitude du volume, la fréquence des silences les articulations sont relevées et moyennées dans le temps.

Toutes ces informations sont transmises aux processus qui génèrent de la musique. De nombreux paramètres sont transmis directement des intrants au sortants, comme la fréquence des silences, le volume, la durée, l'octave, le registre, l'ambitus des intervalles, l'amplitude du volume et l'articulation. D'autres choix musicaux importants sont générés de façon interne par des nombres aléatoires. Ces processus fournissent une bonne part de la « personnalité » du système, et déterminent la mélodie, l'harmonie, l'orchestration, l'ornementation, la pulsation, la transposition, le rythme et certains paramètres optionnels, comme le fait de réagir ou pas à l'information entrante, la fréquence à laquelle les paramètres sont réinitialisés et quels paramètres doivent l'être. En l'absence de tout intrant, tous les paramètres sont générés par des nombres aléatoires<sup>9</sup> »

Si *Voyager* obéit bien à ces principes, alors votre argument de principe ne fonctionne tout simplement pas. Vous dites que l'improvisation suppose la pré-existence d'un plan. Mais il y a deux raisons de penser que les conditions d'existence des plans que vous avez citées plus haut ne sont tout simplement pas remplies. D'une part, *Voyager* est un programme destiné à l'improvisation collective : il s'agit d'un programme capable d'improviser avec un autre musicien. Le comportement du programme est sensible aux choix musicaux produits par son partenaire humain. Il existe bien des règles fixes qui associent des événements musicaux aux symboles qui figurent dans le programme, mais on ne peut pas dire qu'il *existe* dès le départ une représentation de la musique qui

---

9 Cette citation semble être tirée du livret accompagnant le disque *Voyager* (Avant, 1993).

va être jouée, puisque cette représentation est construite progressivement, au fur et à mesure que l'interaction avec le partenaire musical se développe.

*A* : Je vois où vous voulez en venir, mais ne peut-on pas dire qu'il existe néanmoins un plan, au sens où je l'ai défini, à savoir un véhicule représentationnel et une règle ? Certes, la représentation en question est d'un genre assez particulier. Au lieu de représenter des événements musicaux de façon *catégorique*, elle les représente de façon *hypothétique*. Elle exprime un ensemble complexe de relations conditionnelles, du type : si un signal musical ayant telle et telle propriété est perçu, alors un signal musical ayant telle ou telle propriété doit être produit. En ce sens là, les conditions d'existence d'un plan sont remplies : nous avons un véhicule représentationnel, certes complexe, et nous avons une règle sémantique reliant les symboles à des événements musicaux. Nous avons ainsi un plan qui existe dès le départ et qui peut faire l'objet d'une exécution.

*B* : Oui, mais à trop vouloir étendre la notion de plan, vous courrez le risque de rendre le concept d'improvisation complètement vide. Si vous admettez des représentations hypothétiques dans votre définition de ce que c'est qu'un plan, alors on se demande s'il existe vraiment beaucoup d'actions qui échappent à tout plan et tombent sous le concept d'improvisation. Prenez l'exemple de l'orateur qui improvise son discours. Nous pouvons, au moins en principe, nous représenter sa compétence linguistique par un ensemble de relations hypothétiques extrêmement générales (si une phrase commence par un groupe nominal, elle doit être suivie d'un verbe, etc.), encodée d'une façon ou d'une autre dans son cerveau, de telle sorte que tout ce qu'il va bien pouvoir dire lors d'un discours non préparé ne devra pas être considéré comme improvisé selon votre définition, puisqu'il s'agira à chaque fois de l'exécution d'une forme relativement abstraite de plan hypothétique<sup>10</sup>. Donc votre définition de l'improvisation, si l'on admet des représentations hypothétiques, conduit à la conséquence que les exemples que vous teniez pour paradigmatiques ne tombent pas en réalité sous le concept d'improvisation.

*A* : Il y aurait beaucoup à dire sur les détails de ce dernier exemple, mais je m'en tiendrais à l'idée générale. Vous voulez m'enfermer dans un dilemme : ou bien renoncer aux plans hypothétiques et admettre que *Voyager* improvise, selon ma définition au moins, ou bien accepter les plans hypothétiques et reconnaître que les discours non préparés ne sont pas improvisés. Je répondrai cependant en attaquant le raisonnement qui y conduit. Votre argument selon lequel *Voyager* improvise parce que le programme construit son plan d'action au fur et à mesure des échanges dialogiques avec l'improvisateur humain repose sur une subtile confusion entre improvisation et interaction. Tout ce que vous avez montré, c'est que *Voyager* est capable d'interagir avec un musicien, c'est-à-dire adapter son comportement au comportement d'autrui. Mais interagir n'est pas improviser. Un thermostat est capable d'interagir avec son environnement, en adaptant les ordres qu'il va donner à un radiateur en fonction de la température ambiante, mais il ne viendrait à l'idée de personne de soutenir qu'il *improvise* ces ordres. Pour qu'il y ait improvisation il faut qu'il y ait une spontanéité, au-delà d'une simple capacité à réagir.

*B* : Je ne saurais trop vous remercier pour cette remarque qui m'amène très naturellement à mon second point. Si votre mémoire a correctement stocké la description du programme de George Lewis, vous devez avoir conscience que *Voyager* est autant capable d'interagir que de générer de la musique spontanément, c'est-à-dire en l'absence de toute contribution extérieure. *Voyager* sait faire de l'improvisation collective, mais il sait aussi faire de l'improvisation libre en *solo*.

*A* : Pouvez-vous me rappeler comment cela se peut ?

*B* : Le programme utilise des processus qui tirent des nombres au hasard, lorsque *Voyager* doit faire un choix, ou fixer de lui-même un paramètre musical. C'est la seconde raison pour laquelle aucun plan ne préexiste à l'exécution.

*A* : Le hasard, dites-vous ?

*B* : Vous m'avez entendu.

*A* : Donc si je vous comprends bien, vous êtes prêt à accepter l'équation : algorithmes + hasard =

---

10 Cette description de la compétence linguistique n'est pas sans rappeler l'image qu'en a donnée la linguistique dite générative. Pour une théorie de la *production* linguistique qui se place dans la continuité de l'approche générative, et qui accorde une place importante à la notion de plan, voir (Levelt, 1989).

improvisation.

*B* : Je ne sais pas si je présenterais spontanément les choses ainsi, mais c'est une manière de les envisager qui ne me paraît pas totalement absurde.

*A* : Une petite expérience de pensée devrait cependant modifier votre regard. Je ne sais que tout le monde n'aime pas ces expériences fictives qui sont censées nous apprendre des choses importantes sans qu'il soit nécessaire de les réaliser concrètement<sup>11</sup>. Êtes-vous prêt à me suivre sur ce terrain ?

*B* : Oui, mais je dois vous avertir que je ne juge que sur pièce.

*A* : Très bien. Je vous demanderais pour commencer d'imaginer une boîte dans laquelle le temps ne s'écoule pas à la même vitesse qu'à l'extérieur. En particulier le temps s'écoule beaucoup plus lentement. Disons pour fixer les idées, qu'une seconde à l'extérieur de la boîte correspond à une heure à l'intérieur.

*B* : Est-il bien sérieux de raisonner avec des scénarios physiquement impossibles comme vous semblez ici le faire ?

*A* : Tout à fait, dans la mesure où le genre de vérité que je cherche à établir est de nature conceptuelle, donc nous pouvons raisonner avec des situations physiquement impossibles, pourvu qu'elles soient au moins conceptuellement cohérentes.

*B* : OK. J'attends la suite.

*A* : Supposons à présent que la boîte en question soit suffisamment grande pour qu'on puisse y faire entrer un humain et un ordinateur. La boîte elle-même est placée au milieu d'une salle de musique, entourée d'instruments et musiciens. L'ordinateur est connecté à un piano qui joue en temps réel ce que l'ordinateur lui ordonne de jouer. Des microphones qui captent en temps réel ce qui se passe dans la salle de répétition y sont également reliés. Le programme informatique qu'exécute l'ordinateur analyse en temps réel la musique qui lui parvient via les microphones. En fonction des données qui résultent de l'analyse, il prépare une réponse qu'il va renvoyer au piano. Mais comme le programmeur a voulu que le programme manifeste une certaine flexibilité dans l'interaction avec les musiciens présents dans la salle de musique, il se contente de proposer certaines options, sans choisir lui-même laquelle. C'est à l'humain présent dans la boîte que revient la responsabilité de choisir entre les différentes options proposées. Comme le temps s'écoule beaucoup plus lentement dans la boîte que dans la salle de musique, notre congénère a tout le temps dont il a besoin pour faire les choix qui lui sont demandés et ainsi interagir en temps réel avec les musiciens qui improvisent avec lui à l'extérieur de la boîte, même lorsque ceux-ci jouent sur des *tempi* endiablés. En supposant que le programme soit bien fait et que notre congénère fasse des choix artistiquement et esthétiquement raisonnables, les musiciens qui se trouvent à l'extérieur de la boîte ont véritablement le sentiment d'improviser avec un humain. Vous arrivez à me suivre ?

*B* : Jusque là tout va bien.

*A* : Supposons à présent que l'humain, décide de déléguer ses choix au hasard : à chaque fois qu'un choix lui est proposé par l'ordinateur, il lance une pièce, jette un dè, ou utilise n'importe quel processus aléatoire à sa disposition pour choisir entre les différentes options proposées. Maintenant, je vous pose la question suivante : accepterez-vous que l'on dise que l'humain dans la boîte *improvise*<sup>12</sup> ?

---

11 Le recours aux expériences de pensées est devenu extrêmement courant en philosophie ces derniers temps. Il est vrai qu'il existe une tradition d'expériences de pensées en physique (chez Galilée et Sténon pour se limiter à deux auteurs du XVIIe siècle), mais il n'est pas clair que les philosophes utilisent leurs expériences de pensées de la même manière. Pour une étude sur les expériences de pensée en philosophie et en physique, voir (Sorensen, 1992).

12 On peut également remarquer que *A* aurait pu s'appuyer sur un exemple historique pour défendre à peu près la même thèse. Le XVIIIe siècle viennois a connu une mode pour un certain type de jeux musicaux, les *Musikalische Würfenspiele*, grâce auxquels tout un chacun pouvait s'amuser à composer sa propre valse de 16 mesures à l'aide de deux tableaux et de quelques coups de dè. Mesure par mesure, le joueur lance les dè et en fonction du résultat obtenu et des correspondances indiquées sur les deux tableaux il complète la partition de sa petite valse. Voir (Zbikowski, 2002, p. 140-154) pour une présentation et l'analyse détaillée d'un exemple. Il paraît difficile de soutenir que cette valse a été *improvisée* par le joueur (c'est en tout cas ce que dirait probablement *A*). Tout au contraire, si nous suivons les analyses de Zbikowski ces jeux musicaux sont construits à partir de patrons, dont les détails sont certes indéterminés, mais qui incorporent déjà une stratégie compositionnelle que les différents coups de dè viennent simplement réaliser d'une manière particulière.

B : [pas de réponse pendant 3 secondes]

A : C'est bien ce que je pensais. Vous avez du mal à admettre qu'il improvise, parce qu'il n'improvise pas le moins du monde ! Il se contente simplement de lancer un dé quand on le lui demande.

B : Supposons que j'admette que l'humain n'improvise pas. *So what ?*

A : Beaucoup de choses s'ensuivent ! Tout d'abord si l'humain n'improvise pas, et si l'intégralité du comportement de l'ordinateur est dicté par des algorithmes, alors on ne voit pas *qui* pourrait improviser ici. Ensuite, si personne n'improvise, alors on ne peut pas dire que la musique qui sort du piano soit improvisée, quoiqu'en pensent les musiciens qui interagissent avec elle. Enfin, si vous admettez que personne n'improvise la musique qui sort de ce piano, alors vous êtes logiquement contraints d'admettre que le programme *Voyager* n'improvise *pas* la musique qu'il joue dans la mesure où elle est générée exactement selon les mêmes principes que ceux qui gouvernent la boîte : algorithmes + hasard<sup>13</sup>.

B : Votre histoire de science-fiction est bien divertissante, mais je doute qu'elle montre quoi que ce soit de notable. Il y aurait beaucoup de choses à dire à son sujet, mais je me limiterai à un seul point. Le fait que votre homme dans la boîte n'improvise pas ne veut pas dire que le système global que constitue la boîte n'improvise pas. L'improvisation du tout n'implique pas l'improvisation des parties : lorsque vous *improviser* un discours, *vous* improvisez mais il ne s'ensuit pas, pour cela, que tous les neurones qui sont activés improvisent chacun leur décharge électrique. Votre belle expérience de pensée n'accouche que d'un subtil *non sequitur*.

A : La logique formelle de mon argument n'est peut-être pas impeccable, mais j'en maintiens la conclusion : aucun coup de dès jamais ne donnera une improvisation.

B : Je dis au contraire que l'improvisation est fille de l'aléa<sup>14</sup>. Celui des rencontres impossibles à prévoir. A cet égard, il est une nouvelle fois utile d'entrer dans la boîte noire des générateurs de nombres aléatoires pour mieux voir de quoi il s'agit. D'un côté, il n'existe pas à rigoureusement parler d'algorithme capable de délivrer à la demande une suite de nombres aléatoires<sup>15</sup>. En revanche, il existe des algorithmes qui peuvent nous donner des suites de nombres qui *semblent* aléatoires. En particulier, il existe des algorithmes qui peuvent, lorsqu'on leur donne une valeur numérique, appelée « graine », une suite des nombres pseudo-aléatoire. En changeant de graine, on obtient une séquence pseudo-aléatoire différente. Une stratégie couramment utilisée en informatique pour obtenir une graine consiste à prendre valeur en millisecondes de l'horloge temps réel de l'ordinateur. Par exemple, si j'ai besoin que mon programme me donne à la demande un nombre aléatoirement compris entre 0 et 12, par exemple pour déterminer la hauteur d'une note de musique, il suffit qu'il prenne le dernière chiffre de la valeur en milliseconde de l'horloge temps réel de l'ordinateur, qui est une donnée totalement indépendante du choix en question, mais qui, pour cette raison précisément,

13 Cet argument possède un air de famille avec l'argument célèbre de la « chambre chinoise » proposé par Searle (1980). L'argument de Searle visait à montrer qu'aucun programme informatique ne peut posséder la capacité qu'est l'intentionnalité, et en particulier qu'aucun programme ne peut véritablement *comprendre* une langue naturelle même s'il est possible de le programmer de façon à ce qu'il donne des réponses sensées à des questions sensées. L'argument que propose A ici possède la même forme logique, mais substitue l'improvisation à l'intentionnalité.

14 B n'est pas très clair ici sur la différence qu'il fait entre le hasard et « l'aléa ». Ce qu'il dit me rappelle un article de la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* consacré à l'opposition entre la chance (*chance*) et le hasard (*randomness*). Il semblerait que les aléas de B renvoient au concept de chance et ne recouvre pas celui de hasard. Typiquement, le hasard est quelque chose qui ne s'observe que dans la durée : il faut tirer un grand nombre de coup de dès pour voir s'ils ne sont pas pipés, alors que la chance de la bonne rencontre peut se faire en un coup. Le mot latin *alea* (coup de dès) ne permet pas de décider entre ces deux significations qu'il est pourtant important de distinguer ici. Pour plus de précisions, voir (Eagle, 2012). De façon intéressante, un compositeur qui s'est beaucoup intéressé à la notion d'aléa, comme Pierre Boulez (1957), joue lui aussi avec cette opposition entre le hasard et la chance, avec une certaine oréférence pour la seconde. Favoriser activement et conscience la « chance » dans la composition est la solution qu'a trouvée Boulez pour « absorber le hasard », en évitant à la fois le « hasard par inadvertance » du laisser-faire et le « hasard par automatisme » de la composition fondées sur des principes censément objectifs, mais au fond arbitraires.

15 Une manière de définir une suite de nombres aléatoires consiste à dire que le plus court programme capable de générer cette suite n'est autre que la liste des nombres elle-même. C'est l'approche de la théorie algorithmique de la complexité défendue par Gregory Chaitin, à la suite des travaux pionniers de Kolmogorov. Si l'on suit ce point de vue, alors il y a autant de cohérence logique dans l'idée d'un algorithme produisant une suite de nombres aléatoires que dans celle d'un cercle carré. Pour plus de détails, voir (Delahaye, 1999, chapitre 2).

fournit une bonne graine à laquelle appliquer la formule mathématique qui nous donnera une série de nombres apparemment aléatoires. Si, à présent, vous m'accordez un droit à la métaphore, je dirais que l'aléa dans l'improvisation ressemble assez à cela : l'improvisation est faite de rencontres, difficilement prévisibles, entre des processus ayant leur logique propre. Keith Jarrett commence son *Köln Concert* en reprenant le thème de la sonnerie annonçant la fin de l'entracte, et développe une longue improvisation à partir de cette graine contingente, initialisant ainsi une logique musicale faite de *vamps* infinis et d'arabesques virtuoses. Il n'est donc pas exclu qu'en cherchant à construire des programmes qui improvisent, ou en tout cas qui improvisent suffisamment pour pouvoir interagir avec des musiciens, sans que ces musiciens ne s'ennuient trop, on soit conduit à pénétrer plus intimement la nature profonde de l'improvisation qu'en raisonnant *a priori*.

*A* : Cette pointe de lyrisme et ce goût subit pour la métaphore me surprennent venant de vous. Je préfère quant à moi la rigueur du concept à la séduction de l'image, mais peu importe. Pour revenir au fond, je ne vois pas ce que vous pouvez bien espérer de la construction de machines à « improviser » (vous apprécierez, je crois, mon usage des guillemets). Il faut bien distinguer la simulation de la duplication. Il est peut-être possible de simuler certains aspects de ce que nous faisons lorsque nous improvisons (je veux dire : « ce que font nos congénères musiciens lorsqu'ils improvisent »). Nous pouvons donner l'impression à quelqu'un qu'il prend part à une improvisation avec un autre musicien, alors qu'il ne fait qu'improviser avec un savant programme, c'est-à-dire, au fond, avec un savant programmeur. Sauf que le programmeur, à moins d'être un génie d'un genre très particulier, n'a très probablement pas improvisé son programme. Il a très probablement passé de longues heures à le déboguer, comme on dit. Simuler une improvisation n'est pas improviser. Je ne nie pas, soit dit en passant, l'intérêt de ce genre d'entreprise. Elle peut nous apprendre beaucoup de choses intéressantes sur ce que nous *attendons* d'une improvisation lorsque nous l'écoutons ou y cherchons à y prendre part, mais elle ne nous dira pas comment l'improvisation se fait en elle-même, à l'intérieur.

*B* : Simuler, n'est pas dupliquer, j'ai bien compris, merci. Puis-je cependant vous demander de m'expliquer ce qui vous empêche de concevoir qu'une collection d'algorithmes, éventuellement aidés de certains aléas, puisse littéralement improviser de la musique. Comment pouvez-vous être si sûr que le discours que vous avez improvisé le jour de votre anniversaire n'était pas le fruit que quelques chanceux algorithmes ?

*A* : J'ai ma conscience pour moi. Je me souviens très bien de l'effet que cela m'a fait d'improviser ce discours : j'avais le sentiment de produire spontanément chaque phrase, en cherchant et trouvant les mots au fur et à mesure que progressait mon discours. Et encore, le verbe « trouver » décrit imparfaitement ce vécu, qui correspond moins à l'expérience de la découverte qu'à celle de la génération<sup>16</sup>. Mais en aucun cas je n'ai eu le sentiment d'exécuter le moindre algorithme. Peut-être ai-je manqué de chance ?

*B* : Je crois surtout que vous avez le défaut d'accorder trop facilement votre confiance à des personnes douteuses. Il me semblait qu'on parlait de la mécanique interne<sup>17</sup> de l'improvisation, pas de vos états d'âmes. Tout le monde sait de nos jours que la conscience est la dernière informée de ce qui se passe dans notre cerveau<sup>18</sup>.

*A* : Personne ne nie qu'il s'y passe moult choses passionnantes, ou plutôt affreusement compliquées

---

16 Cette remarque me rappelle vaguement certains arguments étudiés lorsque nous étions sur les bancs de la faculté de philosophie. Ceux qui tiennent à tout prix à défendre la réalité de notre capacité à initier radicalement nos actions (contre les « incompatibilistes durs » pour qui le libre arbitre, dans un monde de causes et d'effets, ne peut être qu'une illusion) renvoient souvent à notre prétendue « expérience » de la liberté (après avoir lu la correspondance entre Spinoza et Schuller, je suis restée convaincue que cela n'avait rien à avoir avec le fond du problème, mais peu importe). Pour une étude récente qui cherche à tirer cela au clair à l'aide d'une approche expérimentale voir (Nahmias *et al.*, 2013).

17 Je me permets d'indiquer que les sciences cognitives et les neurosciences, qui s'intéressent à la musique depuis longtemps, ont commencé depuis peu à s'attaquer à cette mécanique interne de l'improvisation. Pour une synthèse des premiers résultats disponibles, voir (Berkowitz, 2010).

18 *B* a semble-t-il eu vent des expériences de Libet (2004) sur l'initiation volontaire des actions motrices. Plus généralement, sur la place accordée à l'inconscient en sciences cognitives et en neurosciences (avec quelques idées sur les relations avec l'inconscient psychanalytique), voir (Naccache, 2006).



(d'une complexité insondable à notre humaine connaissance, si vous voulez mon avis). Mais qui a dit que cela se passait dans le *cerveau* ?

*B* : OK. Il y a aussi le corps et même monde, si vous y tenez. Les pianistes improvisent bien avec leurs mains, leurs pianos, leurs amis contrebassistes, les illustres défunts qui restent peuplent la mémoire collective que constitue leur culture musicale. Je peux m'arrêter, ou vous voulez que je continue encore ?

*A* : Ce n'est pas là que je voulais en venir : la mécanique du cerveau est une chose, le souffle de l'inspiration en est une autre.

*B* : Nous y revoilà. Je comprends bien que la matérialité et/ou la mécanicité de votre âme vous effraie. Mais, très honnêtement, j'ai du mal à croire que quelqu'un d'aussi doué que vous pour les expériences de pensée ait du mal à imaginer que l'improvisation puisse émerger d'une collection de mécanismes qui mis ensemble créent des formes surprenantes.

*A* : J'ai quelque difficulté à concevoir une telle chose, vous l'aurez compris, mais vous m'intriguez.

*B* : Une comparaison peut ici être utile. Nous savons qu'il existe des entités dont le comportement individuel est relativement simple mais qui mises ensembles sont capables de choses tout à fait surprenantes. C'est le cas des neurones, mais aussi par exemple des insectes sociaux comme les fourmis, qui malgré des capacités cognitives individuelles relativement limitées, sont capables d'optimiser certaines opérations (comme trouver le plus court chemin entre deux points) lorsqu'elles fonctionnent ensemble. Une capacité complexe émerge de l'interaction de capacités simples. Pourquoi ne pourrait-on pas dire la même chose de l'improvisation<sup>19</sup> ? Peut-être que notre esprit, lorsque nous improvisons, active un très grand nombre de petits algorithmes qui traitent des informations relativement simples chacun dans leur coin, mais correctement mis ensemble parviennent à générer le comportement plastique et flexible de l'improvisation.

*A* : Je suis désolé, mais je bloque : comment voulez-vous qu'en ajoutant des mécanismes à des mécanismes, même en très grand nombre, on obtienne le souffle de l'improvisation ?

*B* : Votre difficulté est tout à fait compréhensible. Je peux même vous l'expliquer. Elle provient du fait que vous tenez à tout prix à mélanger deux types de concepts qui opèrent à des niveaux distincts. La nécessité des mécanismes ne concerne que le niveau des entités les plus élémentaires. La contingence de l'improvisation ne se manifeste qu'au niveau émergent des comportements humains, à la faveur de la complexité des interactions et de l'aléa des rencontres. Vous vous interdisez de concevoir cette hypothèse parce que traitez vous les mécanismes de base comme des actions, et l'action improvisée comme un miracle renouvelé. Mais une fois que l'on fait la part des choses entre ce qui relève des causes élémentaires et ce qui relève des actions, le blocage devrait se dissiper et vous permettre de donner libre cours à votre imagination débordante<sup>20</sup>.

*A* : [5 secondes de pause]. Vous pouvez imaginer ce que vous voulez, cela ne regarde que vous. Que seule une collection d'algorithmes improvise en nous, voilà quelque chose que je ne peux tout simplement pas concevoir. J'ai pour moi l'analyse des concepts et les données immédiates de la conscience. Rappelez-moi, quelles sont vos sources ?

*B* : J'ai déjà dit ce que je pensais de votre concept d'improvisation et de la fiabilité de vos données. Mais peut-être qu'il ne s'agit pas seulement de nous. La question était de savoir si une machine pouvait improviser. Nous pêcherions sans doute par chauvinisme si nous demandions aux machines d'improviser exactement comme nous le faisons. Les machines n'ont pas de cellules nerveuses, mais est-ce une raison suffisante pour faire une telle discrimination ? Pourquoi n'y aurait-il pas une forme

---

19 David Borgo (2006) a proposé de comprendre la dynamique de l'improvisation collective libres sur le modèle de cette intelligence sociale manifestée par les colonies d'insecte (même s'il est difficile de dire si ce rapprochement va au-delà de la métaphore). Notez que Borgo cherche à comprendre l'improvisation *collective* sur le modèle de cette intelligence collective, alors que *B* semble plutôt s'intéresser à la complexité cognitive interne à l'improvisateur individuel, même s'il admettra probablement que l'improvisation collective étend encore cette complexité à un ordre supérieur.

20 Daniel Dennett a développée des vues similaires dans son livre sur l'évolution de la liberté (Dennett, 2004) en s'appuyant sur l'exemple du *Jeu de la vie*, un jeu mathématique dans lequel des configurations de points sur un échiquier peuvent évoluer de façon extrêmement surprenantes à partir de règles d'interactions relativement simples, de sorte que des formes émergentes apparaissent qu'il est possible de décrire en utilisant des concepts comme ceux d'absorption ou d'évitement qui n'ont aucun sens lorsque l'on ne s'intéresse qu'aux interactions locales.

d'improvisation suffisamment générale pour s'appliquer à la fois à nous et à elles ? Peut-être pas aux machines nous que nous savons déjà fabriquer (encore que...), mais peut-être à des machines futures.

*A* : Comme vous, je ne juge que sur pièce. Trouvez-moi une machine que les meilleurs spécialistes de musique ne sauraient distinguer de nos meilleurs improvisateurs<sup>21</sup>, trouvez-moi des improvisateurs qui délaissent leurs congénères pour rechercher la compagnie de ces machines, et trouvez moi, enfin, des gens prêt à casser leur tirelire pour entendre ces machines en concert, et nous en reparlerons.

*B* : Mais en disant cela vous n'excluez pas, ce me semble, que nous puissions y arriver. Vous reconnaissez implicitement, en d'autres termes, que nous avons affaire à une question empirique, ce dont je suis fort aise. Il ne nous reste donc plus qu'à parier. A moins que vous ne préféreriez tirer à pile ou face ?

## Références

Alperson, Philip, 1984, « On Musical Improvisation », *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, vol. 43, n° 1, p. 17-29.

Alperson, Philip, 2010, « A Topography of Improvisation », *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, vol. 68, n° 3, p. 273-280

Assayag, Gérard et Dubnov, Serguei, 2004, « Using Factor Oracles for Machine Improvisation », *Soft Computing*, vol. 8, n° 9.

Bailey, Derek, 2004, *L'improvisation, sa nature et sa pratique dans la musique*, Paris, Outre Mesure.

Berkowitz, Aaron, 2010, *The Improvising Mind*, Oxford, Oxford University Press.

Borgo, David, 2006, *Sync or Swarm : Improvising music in a complex age*, New York et Londres, Continuum.

Boulez, Pierre, 1957, « Aléa », *La nouvelle revue française*, n° 59, p. 839-857, repris dans Points de repère I, Nattiez Jean-Jacques et Galaise Sophie éd., Paris, Christian Bourgois, 1995, p. 407-420.

Church, Alonzo, 1936, « An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory », *American*

---

21 Je dois ici ajouter que François Pachet, dont il a été question plus haut, a vraiment fait passer l'équivalent pour l'improvisation d'un test de Turing à son programme *Continuator*. Le protocole, décrit dans (Pachet, 2006) est le suivant : le musicien humain, le pianiste Albert Van Veenendaal en l'occurrence, commence par jouer une phrase sur un Yamaha Disklavier (un piano acoustique contrôlable par ordinateur). Lorsqu'il s'arrête, *Continuator*, qui est branché sur le même instrument, propose immédiatement une phrase en retour. Lorsque *Continuator* a fini, Albert Van Veenendaal reprend le dialogue et ainsi de suite. Le jury, composé du musicologue Henkjan Honing et du critique musical Koen Schouten, avait pour tâche d'indiquer en temps réel si la musique entendue provient de l'humain ou de l'ordinateur. Comme la musique produite par l'humain et celle produite par l'ordinateur sortent toutes les deux sur le même instrument, le jury ne peut s'appuyer sur des propriétés acoustiques du signal : il leur faut s'intéresser à la construction du discours musical. L'expérience a été enregistrée, puis retransmise sur la radio hollandaise VPRO. François Pachet (2006, p. 106) rapporte que les critiques se trompaient en moyenne une fois sur deux, ce qui tend à indiquer que la différence entre l'improvisation humaine et l'improvisation artificielle n'est pas humainement décelable. *Continuator* passerait ainsi le test de Turing de l'improvisation musicale, mais ce résultat doit à mon sens être pris avec des pincettes. D'une part, il faudrait multiplier les expériences (avec d'autres pianistes et d'autres juges, pour voir si cette tendance se confirme) et d'autre part, à supposer que cette tendance se confirme, il faut encore justifier la conclusion selon laquelle *Continuator* improvise littéralement. François Pachet, pour sa part reste relativement prudent : « ce test fut probablement le premier test de Turing d'improvisation libre". Son résultat positif démontre que le système peut correctement modéliser le style de jeu d'un improvisateur, au moins pour une courte durée » (2006, p. 106).

*Journal of Mathematics*, vol. 58, p. 345–363.

Moor, James éd., 2003, *The Turing Test : the Elusive Standard of Artificial Intelligence*, Dordrecht, Kluwer.

Dean, Roger, 2009, « Envisaging Improvisation in Future Computer Music », in Dean Roger éd., *The Oxford Handbook of Computer Music*, Oxford et New York, Oxford University Press, p. 133-147.

Delahaye, Jean-Paul, 2009, *Information, complexité et hasard*, Paris, Hermes.

Dennett, Daniel, 2004, *Théorie évolutionniste de la liberté*, traduction française de Christian Cler, Paris, Odile Jacob.

Levelt, Willem, J. M., 1989, *Speaking : From Intention to Articulation*, Cambridge, The MIT Press.

Lewis, George, 1996, « Improvised Music after 1950 : Afrological and Eurological Perspectives », *Black Music Research Journal*, vol. 16, n° 1, p. 91-12.

Lewis, George, 2000, « Too Many Notes: Computers, complexity and culture in Voyager » *Leonardo Music Journal*, vol. 10, p. 33-39.

Libet, Benjamin, 2004, *Mind Time : the Temporal Factor in Consciousness*, Cambridge, Harvard University Press.

Naccache, Lionel, 2006, *Le nouvel inconscient*, Paris, Odile Jacob.

Nahmias, Eddy, Morris, Stephen, Nadleoffer, Thomas, Turner, Jason, 2013 « The Phenomenology of Free Will », in Russell, Paul et Deery Oisin, *The Philosophy of Free Will*, Oxford et New York, Oxford University Press, p. 486-505.

Nika, Jérôme et Chemillier, Marc, 2012, « ImproteK : intégrer des contrôles harmoniques pour l'improvisation musicale dans la filiation d'OMax », *JIM 2012 Journées d'informatique musicale*, Mons, Belgique, 9-11 mai 2012, pp. 147-155.

Pachet, François, 2006, « Interactions réflexives », in Orlarey, Y. dir., *Actes des rencontres musicales pluridisciplinaires*, Lyon, Grame.

Pachet, François, 2012, « Musical Virtuosity and Creativity », in McCormack, J. and D'Inverno, M. dir. *Computers and Creativity*, Berlin, Springer, 2012, p. 115-146.

Searle, John, 1980, « Minds, Brains and Programs », in *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 3, n° 3, p. 417-457.

Sorensen, Roy, 1992, *Thought Experiments*, Oxford, Oxford University Press.

Syropoulos, Apostolos, 2008, *Hypercomputation. Computing Beyond the Church-Turing Barrier*, New York, Springer.

Turing, Alan, 1936, « On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem* », *Proceedings of the Mathematical Society*, série 2, vol. 42, p. 230-265.

Turing, Alan, 1950, « Computing Machinery and Intelligence », *Mind*, vol. LXI, n°236, p. 433–460.

Zwiboswki, Lawrence, 2002, *Conceptualizing Music*, Oxford et New York, Oxford University Press.