



HAL
open science

IA et dé-coïncidence créative

Jean-Pierre Briot

► **To cite this version:**

| Jean-Pierre Briot. IA et dé-coïncidence créative. 2024. hal-04757391v2

HAL Id: hal-04757391

<https://hal.science/hal-04757391v2>

Preprint submitted on 31 Oct 2024 (v2), last revised 11 Nov 2024 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

IA et dé-coïncidence créative

Jean-Pierre Briot

Sorbonne Université, CNRS, LIP6, F-75005 Paris

CREATIVITE

Définition

Wikipédia propose la définition suivante de la créativité : « la créativité est – de façon générale – la capacité d'un individu ou d'un groupe d'individus ou d'êtres non-humains à imaginer et mettre en œuvre un concept neuf, un objet nouveau, à combiner des idées existantes ou à découvrir une solution originale à un problème. Elle combine donc deux dimensions : imagination et efficacité... ».

Une production créative (quel que soit le domaine : résolution de problème, art, etc.) doit en effet combiner à la fois :

- originalité, et
- pertinence¹.

Serait-ce une forme de dé-coïncidence/re-coïncidence [Jullien, 2017] ? Dans laquelle le créateur (individu ou collectif) dé-coïncide, et sort de sa zone de

¹ Nous préférons ici utiliser pertinence, ou encore faire sens par rapport au contexte, à efficacité (traduction habituelle de l'anglais « effectiveness »), qui selon nous ramène trop à une résolution de problème et à une optimalité. Or, notamment en art, la créativité ne cherche pas à être efficace, car il n'y a pas de problème à résoudre, mais il s'agit de créer un objet artistique qui fait sens, et ainsi en résonance avec une culture [Rosa, 2018].

confort, pour produire un chemin original, et en même temps recoïncider avec le sens ?

Notons que la créativité a souvent été présentée comme une spécificité de l'espèce humaine. Cependant, ceci a commencé à être remis en cause en analysant les capacités de certains animaux, tels des corbeaux ou des singes, d'utiliser des outils, notamment pour collecter de la nourriture (par exemple, respectivement, en cassant des coquilles avec des pierres, ou en retirant un aliment d'un vase après avoir courbé une tige). Nous discuterons plus loin la capacité d'une machine d'être ou pas créative.

Niveaux

On peut considérer différents types/niveaux de créativité, par exemple selon [Boden, 2004] :

- combinatoire

La créativité combinatoire implique la génération de combinaisons inconnues (et intéressantes) d'idées familières. Des exemples sont :

- la création de valse viennoises par combinaison aléatoire de segments pré-définis, dans le jeu de dés musical (« Musikalisches Würfelspiel ») attribué à Mozart [Mozart, 1793],
- la partie de Go entre AlphaGo et le champion du monde humain Lee Sedol, où à un moment donné au cours d'une partie (le coup 37²), un mouvement très inattendu d'AlphaGo a laissé Lee Sedol et les spécialistes perplexes,

² On peut parler de découverte par AlphaGo, plus que de création.

puis admiratifs³, et semble au final avoir été un tournant fondamental majeur vers la victoire.

- exploratoire

Les règles ou conventions stylistiques sont utilisées pour générer de nouvelles structures (idées), dont la possibilité peut ou non avoir été réalisée avant que l'exploration n'ait eu lieu⁴.

- transformationnel

Il y a cette fois un changement complet de paradigme. On pourrait ainsi parler de dé-coïncidence majeure ou complète, puisque les fondements initiaux sont complètement remis en cause. Des exemples sont :

- le dodécaphonisme, en rupture complète avec le modèle antérieur, la musique tonale⁵,

³ « C'est une décision créative », a déclaré le commentateur du match et joueur professionnel Michael Redmond à propos du changement soudain de tactique d'AlphaGo : « C'est quelque chose que je ne pense pas avoir vu dans le jeu d'un joueur de très haut niveau. » [Metz, 2016].

⁴ À vrai dire, la distinction de Boden entre combinatoire et exploratoire ne nous semble pas suffisamment claire. Une meilleure distinction pourrait être l'hypothèse sur l'existence d'un espace de possibilités prédéfini (le cas par exemple pour un jeu d'échec, ou même pour des algorithmes génétiques, et ainsi explorable de manière combinatoire), versus un espace non combinatoire, découvert en temps réel par un robot, ainsi sujet à une exploration plus générale.

⁵ Par opposition à la musique tonale, qui est fondée sur l'existence d'un centre tonal, le dodécaphonisme, proposé par Arnold Schönberg en 1923 [Schoenberg et Stein, 2010], vise au contraire à une équité entre les 12 notes (de Do à Si). C'est d'ailleurs pour cela qu'il est appelé dodécaphonisme, ou encore musique sérielle, du fait qu'un point de

- la musique stochastique⁶,
- la physique quantique, en rupture complète avec les modèles antérieurs, la physique classique⁷.

De plus, la créativité peut être mise en œuvre à différentes échelles temporelles, et de manière itérative, lors par exemple de résolution de problèmes, ou en temps réel, lors d'improvisations musicales, comme nous le verrons ci-dessous.

Neurosciences

Les neurosciences commencent à proposer des analyses intéressantes sur la créativité, par exemple en constatant une activité accrue au sein de trois réseaux différents du cerveau :

- le réseau du mode par défaut (le « réseau d'imagination »), essentiel aux activités créatives telles que le « brainstorming » et la rêverie ;
- le réseau central exécutif (également appelé le réseau fronto-pariétal ou encore « réseau d'attention »), responsable de l'attention ciblée et de la concentration ;

départ pour la composition est le choix d'une suite de ces douze notes, où chacune doit avoir été jouée avant de pouvoir en répéter une.

⁶ Dans la musique stochastique, élaborée par Iannis Xenakis à partir de 1955 [Xenakis, 1992], le compositeur définit des lois (distributions) de probabilité (pour différentes caractéristiques, telles la hauteur et la durée) et procède à des tirages aléatoires qui suivent ces distributions. C'est la responsabilité du compositeur de spécifier les lois de probabilités mais également et surtout de choisir parmi les échantillons générés par tirage aléatoire.

⁷ Notamment la mécanique Newtonienne et la théorie électromagnétique de Maxwell.

- le réseau de saillance (ou « réseau du sens »), chargé de surveiller le flux de conscience interne, ainsi que les stimuli et événements externes, et de marquer les entités comme intéressantes ou non.

L'analyse temporelle de la connectivité entre les régions du cerveau lors d'une tâche créative (en l'occurrence ici, de proposer oralement un usage non standard d'un objet standard) a révélé un couplage accru entre le réseau du mode par défaut et le réseau de saillance au début de la tâche, suivi d'un couplage accru entre le réseau du mode par défaut et le réseau central exécutif aux stades ultérieurs [Beatty et al., 2015].

Ces résultats étayent l'idée selon laquelle la pensée créative implique une coopération entre des processus spontanés et des processus contrôlés. Le réseau de saillance est impliqué dans la réaffectation des ressources attentionnelles aux événements environnementaux saillants, et on pense qu'il joue un rôle central dans la commutation dynamique entre d'autres réseaux cérébraux, en particulier le réseau du mode par défaut et le réseau central exécutif. Ainsi, la pensée créative ne repose pas sur un seul de ces réseaux, mais sur la commutation constante des connexions entre les capacités de brainstorming du réseau de mode par défaut et le réseau central exécutif axé sur la prise de décision. Le réseau de saillance est chargé de surveiller lequel de ces réseaux est le plus apte à traiter les idées à un moment donné et de passer à un réseau différent si nécessaire [Koontz, 2019].

Prenons maintenant l'exemple de l'improvisation dans un groupe de jazz, lors de la création d'un solo. Cela nécessite initialement une activité accrue dans le réseau du mode par défaut (pour produire un nouveau motif musical). Une fois que le musicien a dans sa tête les prémices d'un motif (par exemple une esquisse de mélodie), le réseau de saillance donne le contrôle au réseau central exécutif, pour créer une mémoire de travail de ce motif transitoire et se concentrer sur la consolidation de ce motif, de manière à ce qu'il soit bien adapté au contexte et mémorable [Limb et Braun, 2008].

Si l'on tente d'interpréter ces phénomènes mentaux en termes de dé-coïncidence, on pourrait rapprocher l'activation du réseau de mode par défaut à une forme de dé-coïncidence, qui déclenche l'imagination et fait sortir le créateur de sa zone de départ et de confort, puis une re-coïncidence quand le réseau de saillance active le réseau central exécutif pour se réaligner sur l'objectif initial et le sens.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA)

Définition

Avant d'aborder l'IA et la création, en particulier musicale, il est utile de commencer à parler du nom même d'IA, acronyme d'intelligence artificielle. La plupart de ses définitions concernent la simulation et la comparaison avec l'intelligence humaine. Le néologisme « intelligence artificielle » a été créé lors du workshop « Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence » aux États-Unis en 1955⁸, avec cet objectif affiché : « L'étude doit procéder sur la base de la conjecture que chaque aspect de l'apprentissage ou toute autre caractéristique de l'intelligence peut en principe être décrit avec une telle précision qu'une machine peut être conçue pour le simuler. »

On peut noter qu'une telle définition est plus un objectif qu'une définition précise⁹, surtout si l'on considère que nous n'avons pas une définition consensuelle de l'intelligence humaine. Je suggère donc d'utiliser une autre définition, plus computationnelle, qui avait été proposée en 1986 par un des pionniers français de l'IA, Jean-Louis Laurière : « L'IA commence là où s'arrête l'informatique classique : tout problème pour lequel il n'existe aucun algorithme connu ou raisonnable lui permettant d'être résolu, relève *a priori* de l'IA. »

Prenons l'exemple du jeu d'échecs ou de go (où une recherche exhaustive n'est pas réalisable, car l'arbre des coups possibles alternatifs est trop grand et trop profond pour être exploré), nous pouvons alors utiliser des connaissances (par exemple, des symétries, des heuristiques, pour estimer la valeur d'une position), et également des connaissances acquises en apprenant à jouer au jeu (ce qui est d'ailleurs exactement l'approche qu'AlphaGo a suivie pour battre le champion

⁸ Le texte original de la proposition a été republié et rendu disponible [McCarthy et al., 2006].

⁹ Ceci n'est d'ailleurs pas étonnant, comme il s'agissait d'un workshop de montage d'un projet de recherche sur le sujet et de préparation d'une demande de financement.

du monde humain de Go). L'approche de l'IA consiste ainsi à déléguer une partie des responsabilités et des décisions à la machine, on parle alors d'agent autonome artificiel, pour tenter de résoudre ou d'approcher la résolution d'un problème spécifique. Nous attribuons (déléguons) à cet agent artificiel un objectif, des ressources informatiques, des connaissances (par exemple, des règles et des heuristiques), ainsi que des méthodes et techniques (par exemple, décomposition de problèmes, planification, coordination avec d'autres agents – artificiels ou humains –, et apprentissage, afin de capitaliser sur les expériences passées) comme moyens pour atteindre par lui-même l'objectif.

Cette délégation peut être complète, à un agent complètement autonome, par exemple un robot autonome sur Mars, ou partielle, par exemple, l'agent étant un assistant support pour des algorithmes écrits par l'homme ou des décisions humaines. Dans l'application de l'IA à la musique, qui est notre sujet d'intérêt, nous proposerons bientôt une distinction similaire entre le cas d'un agent complètement autonome générant de la musique par lui-même de bout en bout, ou d'un (ou des) agent assistant fondé sur l'IA aidant les humains à créer de la musique.

Pluralité

Notons que cette définition, ainsi que la réalité historique et présente, implique que l'IA est plurielle au niveau des différentes techniques qui la constituent. Ainsi, l'IA est une boîte à outils qui ne repose pas uniquement sur l'apprentissage machine, même si, comme nous le verrons, l'apprentissage profond est actuellement la principale force et type de technique utilisée.

Notons également que ces différentes techniques sont elles-mêmes des implémentations d'algorithmes. À première vue, cela peut paraître contradictoire avec la définition « l'IA commence là où les algorithmes s'arrêtent ». Mais ces techniques sont au « niveau méta », elles ne résolvent pas directement l'objectif. Elles visent à contribuer à la gestion de cet objectif, et dans certains cas, en cas d'apprentissage, à générer un algorithme spécialisé, par exemple un modèle de classification des visages humains.

Par ailleurs, les approches et techniques d'IA peuvent également être classées selon deux catégories principales :

- La 1^{ère} catégorie, communément appelée approche symbolique, s'inspire du raisonnement logique du cortex humain, et s'appuie donc sur des concepts, des connaissances et des capacités de raisonnement (par

exemple, des règles de déduction). Un exemple est la classe des « systèmes experts », appliquée par exemple à la surveillance de processus ;

- La 2^{ème} catégorie, nommée approche sous-symbolique, ou parfois approche connexionniste, en référence aux connexions des systèmes neuronaux, s'inspire¹⁰ de la structure et de mécanismes biologiques plus fondamentaux, comme la reconnaissance de formes par le cortex visuel, avec l'exemple des réseaux des réseaux de neurones artificiels.

Soulignons que ces deux approches sont complémentaires et analogues à ce que le prix Nobel d'économie Daniel Kahneman appelle Système I et Système II [Kahneman, 2012], le Système I étant rapide et intuitif, comme les réseaux de neurones artificiels, et le Système II étant plus lent, plus contrôlé et plus logique, comme un module de raisonnement d'un système expert. À l'heure actuelle, les applications de la 2^{ème} catégorie appelées réseaux de neurones artificiels profonds, ou plus brièvement apprentissage profond¹¹, sont tout simplement spectaculaires, voire même inattendues, dans de nombreux domaines d'application, tels que la reconnaissance faciale, la traduction, etc., et bien sûr le sujet qui nous intéresse ici, l'IA générative, pour générer du texte

¹⁰ Il s'agit pour certains aspects, d'une inspiration plus métaphorique et technologique que biologique, notamment pour les actuels algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels, dont les principes de l'apprentissage restent fondés sur la régression non linéaire, et non pas sur des modèles biologiques.

¹¹ En anglais, « deep learning ». Actuellement en pointe, il s'agit d'une approche de « force brute », avec des principes simples (à la base des couches successives de régression linéaire, en sandwich avec des fonctions non linéaires, permettant d'approximer des fonctions arbitraires, par exemple de correspondance entre des images et des classes de visages à reconnaître). Leur succès actuel provient à la fois de la disponibilité d'une énorme quantité d'exemples et d'une très grande puissance de calcul associée.

(par exemple avec ChatGPT), de la musique ou encore des images et des vidéos. Mais cela ne veut pas dire que l'IA symbolique est morte, et bien qu'impresionnant, l'apprentissage profond présente certaines limites, comme nous le verrons.

PROTO-CREATIVITE ARTIFICIELLE

Positionnement

Notre première hypothèse est que la créativité implique la présence chez l'agent créatif d'une capacité d'évaluation de la pertinence de ses créations¹². Ainsi, dans le cas mentionné plus haut du coup n° 37 de la partie de Go entre AlphaGo et Lee Sedol, la pertinence de ce coup a été évaluée et qualifiée *a posteriori* par des experts humains. Ce coup a été évalué par AlphaGo comme *a priori* le meilleur à ce moment-là et de ce fait choisi et joué, mais il n'est pas du tout clair qu'AlphaGo a une capacité propre d'évaluer, cette fois *a posteriori*, l'impact de ce coup (une capacité d'analyse rétrospective).

Notons, par ailleurs, que nous ne préjugeons pas de l'existence d'une conscience¹³, mais donc *a minima*, d'une capacité d'évaluation rétrospective. Or,

¹² Par ailleurs, ceci ne préjuge pas du type de méthode d'exploration utilisée. Par exemple, les surréalistes ont inventé des méthodes « automatiques », sans intention ni attention explicite, fondée sur des associations libres d'idées ou de dessins, telles que la méthode des cadavres exquis (qui consiste à faire composer une phrase, ou un dessin, par plusieurs personnes sans qu'aucune d'elles ne puisse tenir compte des collaborations précédentes).

¹³La définition de la conscience, comme celle de l'intelligence, reste encore multi-perspective et peu consensuelle. Personnellement, nous choisissons ici l'analyse de [Dehaene et al., 2017] qui identifie 3 caractéristiques majeures : 1) l'activité (vigilance et éveil, dans le cas d'un être humain, et état allumé pour une machine telle qu'un ordinateur) ; 2) la disponibilité globale de l'information (toute représentation consciente

dans les prototypes actuels informatiques, d'IA générative ou bien de jeux tels qu'AlphaGo, fondés sur des techniques d'apprentissage neuronal profond ou/et par renforcement, la capacité d'auto-évaluation *a priori* est centrale, mais reste définie par le concepteur humain. De ce fait, nous préférons parler de « pseudo-créativité artificielle », terme proposé par [Runco, 2023], ou personnellement plutôt de « proto-créativité artificielle », afin de souligner que les capacités actuellement manquantes pourraient à (long) terme être remplies¹⁴. Pour parler d'une créativité artificielle, une plus grande autonomie dans la capacité d'évaluation par la machine nous semble indispensable, ainsi que des aspects connexes, tels que la motivation intrinsèque et l'ancrage des expériences¹⁵.

Une autre capacité mise en avant par certains auteurs est l'intentionnalité. En effet, la machine n'a, pour le moment encore, pas d'intention propre, autre(s) que celle que l'être humain lui attribue et demande d'exécuter. Cependant, la présence d'une intentionnalité ne nous semble pas nécessaire, car une intentionnalité peut être également absente chez l'homme, par exemple dans

est rendue disponible à l'ensemble des traitements); 3) l'auto-surveillance (correspondant à ce qui est aussi appelé introspection ou méta-cognition).

¹⁴ Il est par contre toujours risqué de proposer un horizon temporel pour telle ou telle capacité de l'IA. La plupart du temps, ce type de prédiction échoue. Par ailleurs, il est encore plus risqué de prétendre que cela sera sûrement atteint (hypothèse de la singularité) ou au contraire jamais atteint.

¹⁵ Nous suivons en cela par exemple le concept d'énaction proposé par Francisco Varela [Varela et al., 1992], qui postule la nécessité d'incarnation physique des actions. De ce point de vue, les développements actuels en matière de robotique et d'intégration avec des modèles d'IA (tels que Chat-GPT, ainsi que de raisonnement exact) augure d'avancées intéressantes, car les agents robotiques devraient être ainsi capables d'un ancrage des concepts manipulés dans un univers partagé avec les humains, ainsi que d'une expérience subjective et sensible propre.

l'inspiration provenant de rêves. Nous préférons ainsi plutôt considérer la motivation, et plus précisément la motivation intrinsèque, qui ne doit pas provenir d'un être humain, mais de la machine elle-même [Oudeyer et al., 2007]. La théorie du flow [Csikszentmihalyi, 1990], est de ce point de vue intéressante, car elle théorise le maintien de l'adéquation (là encore, un maintien ou renouvellement de coïncidence) entre compétences et défi pour maintenir la motivation.

Mise en œuvre

La proto-créativité artificielle de type combinatoire est assez naturellement mise en œuvre en informatique, par des techniques d'exploration combinatoire, de résolution de contraintes, ou d'IA. Un exemple ancien mais intéressant est le prototype AM (Automated Mathematician) de Douglas Lenat en 1976, pour la découverte¹⁶ de concepts et théorèmes mathématiques.

La créativité de type exploratoire est plus ambitieuse, mais peut être abordée par exemple par des techniques d'apprentissage par renforcement. La créativité de type transformationnelle apparaît plus futuriste pour le moment. Le problème n'étant d'ailleurs pas tant la construction et l'exploration de nouveaux espaces, que la capacité d'évaluer leur pertinence.

¹⁶ L'utilisation par Lenat du mot découverte, plutôt que création, est important. Il s'agit en effet de découvrir des concepts et propriétés déjà présentes en intension dans le potentiel combinatoire des axiomes de base, et découvertes en extension par exploration combinatoire, contrôlée par des heuristiques ayant pour objectif d'évaluer l'intérêt potentiel des concepts découverts. AM a été suivi par Eurisko. Voir dans [Lenat et Seely Brown, 1984] une analyse de leurs limites, notamment sur l'importance des choix de représentation interne informatique et sur la responsabilité humaine de l'interprétation des découvertes.

En effet, les prototypes actuels d'IA n'ont pas d'expérience sensible propre et de construction d'une esthétique propre à partir de leur expérience, et d'interactions sociales¹⁷.

Actuellement, ces techniques d'apprentissage supervisé ou par renforcement, et de manière générale d'optimisation, reposent sur l'existence d'une fonction objective (quantifiable et calculable) d'évaluation de la pertinence – la fonction d'adéquation (« fitness ») ou de perte (« loss ») – qu'il faudra optimiser. Or, n'y a par exemple pas de fonction claire correspondant à une « bonne musique ».

De plus, ces techniques d'apprentissage supervisé de type réseaux de neurones profonds sont très efficaces pour apprendre un style musical, puis générer des échantillons correspondant à ce style appris. Mais elles ne visent pas l'originalité, et au contraire une conformité maximale au style appris. Les chercheurs tentent depuis de favoriser une certaine originalité dans la génération, ainsi que des moyens de contrôle, par des techniques plus ou moins ad-hoc, comme nous allons le voir.

IA générative

L'IA générative est une des branches de l'IA de type réseaux profonds, qui, à la différence des tâches et applications classiques portant sur la prédiction (par exemple, de la météo) ou la classification (par exemple, de visages), vise à produire du contenu. Elle est devenue très populaire avec ChatGPT. Outre l'architecture du Transformer, utilisée par ChatGPT et aussi pour les outils de traduction, il existe d'autres architectures spécialisées, tels les VAE

¹⁷ [Salganik et al., 2006] montrent l'importance de l'influence sociale sur les choix humains en matière de préférences musicales, et de manière générale dans les marchés culturels.

(autoencodeurs variationnels), les GAN (réseaux antagonistes génératifs)¹⁸, ainsi que plus récemment les modèles de diffusion, évolution¹⁹.

L'architecture des réseaux antagonistes génératifs (GAN) est très utilisée pour la création d'images ou vidéos plus vraies que nature (et dénommées « fake »). Elle fonctionne selon le principe d'un test de Turing²⁰, itératif, où deux réseaux profonds antagonistes apprennent simultanément. Le premier (le générateur) apprend à générer des échantillons pour tromper le second (le discriminateur) qui lui apprend à distinguer entre des échantillons réels et des échantillons artificiels générés par le générateur. L'objectif est de générer des échantillons dans le style appris, et le plus indistinguables possibles des échantillons réels.

Cette architecture a été étendue en une architecture de réseaux antagonistes créatifs (CAN) [Elgammal et al. 2017], selon l'idée suivante : le générateur reçoit du discriminateur non pas un mais deux signaux de feedback : 1) le premier signal, analogue au cas du GAN standard, représente l'estimation par le discriminateur que l'échantillon provient de l'ensemble de données d'entraînement des véritables œuvres d'art ; 2) le deuxième signal représente la facilité avec laquelle le discriminateur peut classer l'échantillon généré parmi des styles préétablis. S'il existe une forte ambiguïté (c'est-à-dire que les différentes classes sont équiprobables), cela signifie que l'échantillon généré est difficile à

¹⁸ En anglais, « generative adversarial networks » (GAN).

¹⁹ Pour plus de détails sur ces familles d'architectures d'IA générative, voir par exemple [Goodfellow et al. 2016], ainsi que [O'Connor, 2022] sur les modèles de diffusion.

²⁰ Le test de Turing (ou test d'imitation) est une proposition de test d'IA fondée sur la faculté d'une machine à imiter la conversation humaine. Il consiste à mettre un humain en confrontation verbale à l'aveugle avec un ordinateur et un autre humain. Si la personne qui engage les conversations n'est pas capable de dire lequel de ses interlocuteurs est un ordinateur, on peut considérer que le logiciel de l'ordinateur a passé avec succès le test [Turing, 1950].

intégrer parmi les styles artistiques existants, ceci suggérant la création d'un nouveau style²¹.

Un autre problème encore plus général est le contrôle de la génération. Car le créateur humain peut en général vouloir s'inspirer d'œuvres et de styles d'autres artistes, mais tout en appliquant ses propres préférences et contraintes. D'un point de vue technique, ceci pose des enjeux profonds, car les techniques d'apprentissage ne sont *a priori* pas conçues pour contrôler la génération. Des approches partielles sont par exemple par conditionnement (où l'on entraîne le réseau de neurones avec une entrée supplémentaire), par exemple pour pouvoir conditionner la génération de la musique par le texte de la chanson, pour des applications telles que Suno et Udio (qui seront présentées plus loin).

Enfin, une autre limitation, encore plus fondamentale, tient au principe même d'apprendre un style à partir d'œuvres existantes. Il ne s'agit donc pas de la modélisation d'un processus même de création, mais d'une extrapolation à partir d'artéfacts préexistants.

CREATION MUSICALE

Composition et son

En matière de musique, le défi de la création est de créer une musique intéressante, à la fois innovante et pertinente, et d'arriver à maintenir un équilibre entre prédictibilité et surprise²².

²¹ Notons que cette approche suppose l'existence d'une classification préexistante de styles (en l'occurrence de styles de tableaux : figuratif, impressionnisme, cubiste, etc.) et qu'elle réduit l'idée de créativité à l'exploration de nouveaux styles (ce qui a un certain ancrage dans l'histoire de l'art).

²² Le compositeur Arnold Schönberg soutenait que la joie ou l'excitation ressentie en écoutant de la musique naît de la lutte entre deux impulsions opposées : « la demande de répétition de stimuli agréables et le désir opposé de variété, de changement, d'un

Il n'y a pas de méthode canonique de création de musique. Cependant nous pouvons distinguer deux approches principales :

- L'approche « classique », centrée sur la composition. Elle débute en général par une inspiration de lignes mélodiques ou/et harmoniques, ensuite testées sur (ou provenant d') un instrument (en général un piano), affinage et construction progressive (par exemple, par transposition, harmonisation ou contrepoint, structuration, etc.), avec une boucle interactive, suivie par l'orchestration, etc. On a une approche descendante par raffinement, un peu comme pour une méthodologie de génie logiciel, en raffinant progressivement une spécification formelle jusqu'à un programme informatique exécutable, avec des phases de vérifications et de tests et de possibles retours en arrière.
- L'approche des musiques modernes, pour lesquelles la démarche est au contraire centrée sur le son et la production. De nombreux artistes travaillent à partir de boucles de sons, préexistantes ou créées, qu'ils affinent et combinent (empilent), avec un travail centré sur la production musicale. On a donc cette fois une approche ascendante en partant de matériaux sonores. La démarche n'est à vrai dire pas foncièrement nouvelle, car Pierre Schaeffer, l'inventeur de la musique concrète en 1948, la « bricolait » déjà par combinaison de sillons fermés, puis par des collages de bandes magnétiques, bien avant l'avènement des échantillonneurs sonores (les « samplers »). La fondation technologique actuelle est constituée de plateformes logicielles audio numériques modernes, telles que Garage Band, Ableton Live et autres. Ces stations logicielles sont d'ailleurs souvent les descendants de

nouveau stimulus. » [Schönberg, 1978]. On retrouve ici la dualité entre originalité et pertinence introduite au début.

prototypes créés par des chercheurs dans des laboratoires souvent publics.

Évaluation de l'évolution

Avant même de considérer l'insertion de l'IA dans un processus de création musicale et son impact, on peut constater une tendance à l'uniformisation et à la simplification pour la musique populaire occidentale contemporaine.

Une analyse qualitative de la qualité compositionnelle musicale des thèmes des différents films de James Bond conclut à un effondrement récent de la qualité compositionnelle musicale [Guéreau, 2023].

L'étude de [Serrá et al., 2012] analyse elle de manière quantitative l'évolution de la complexité musicale dans la musique populaire occidentale contemporaine, à partir de caractéristiques musicales primaires telles que : la hauteur, le timbre et l'intensité. Alors que ces mesures sont restées stables depuis plus de cinquante ans, les auteurs constatent depuis peu une restriction de la variété parmi les progressions de hauteur, une homogénéisation de la palette timbrale et des niveaux d'intensité croissants. Ce que l'on peut reformuler en termes de : simplification des mélodies et des suites d'accords, omniprésence de sonorités à la mode et une tendance à la restriction de la variabilité de la dynamique²³.

Une autre étude de [Percino et al., 2014] analyse l'évolution de la complexité instrumentale des différents styles musicaux selon deux mesures : la variété instrumentale (le nombre moyen d'instruments utilisés pour un style musical donné), et l'uniformité instrumentale (le nombre moyen d'autres styles utilisant un instrument typiquement utilisé dans ce style)²⁴. Pour ces auteurs, la

²³ En partie du fait de l'utilisation devenue systématique de techniques de compression lors de la production ainsi que lors de la numérisation (des CDs à MP3), menant à ce qui a été appelé la « loudness war » [Siegel, 2009].

²⁴ À la différence de l'étude précédente, les caractéristiques sonores ne sont cette fois pas considérées, seulement les rapports entre style musical et instruments utilisés.

complexité instrumentale d'un style musical est caractérisée par une grande variété instrumentale et une faible uniformité. Bien que la distribution globale de la complexité instrumentale sur les styles musicaux soit robuste, la complexité des styles individuels peut montrer des changements spectaculaires au cours du temps, c'est le cas des styles « new wave » ou « disco », dont la complexité a augmenté rapidement avant de chuter, alors que d'autres styles, tel le « folk rock », sont restés très complexes dans le temps. D'après les auteurs, ces changements d'un style sont liés à la dynamique du volume de ventes et du nombre d'artistes contribuant (à ce style). Lorsqu'un style attire un nombre croissant d'artistes, sa variété instrumentale augmente en général. En revanche, les ventes d'albums d'un style donné augmentent en général à mesure que la complexité instrumentale diminue. Autrement dit, un style musical a tendance à devenir de plus en plus stéréotypé en termes d'instrumentation (et uniformisation des compétences des instrumentistes), une fois que le succès commercial ou grand public s'installe.

Utilisation de l'IA

Parmi les motivations d'utilisation de l'IA pour augmenter la créativité humaine, [Eapen, et al., 2023] souligne notamment :

- « Les entreprises peuvent être victimes de la malédiction de l'expertise. Les experts du domaine qui sont les meilleurs pour générer et identifier des idées réalisables ont souvent du mal à générer ou même à accepter des idées nouvelles. » ;
- « Les personnes qui manquent d'expertise dans le domaine peuvent identifier de nouvelles idées, mais ne pas être en mesure de fournir les détails qui rendraient ces idées réalisables. Elles ne peuvent pas traduire des idées confuses en conceptions cohérentes. »

D'après ces auteurs, l'IA peut aider des créatifs à sortir de leur zone de confort (et ainsi dé-coïncider), en « promouvant la pensée divergente (et sans être restreint par des présupposés en termes de forme ou de fonction), en créant des associations entre des concepts éloignés et en produisant des idées tirées de ceux-ci. » L'article expérimente par exemple la création de designs originaux en deux étapes : génération d'une chimère graphique (éléphant et papillon), puis génération contrôlée (conditionnée) de prototypes de chaises ou de chocolats inspirés par elle.

IA et création musicale

Si l'on analyse maintenant l'utilisation de techniques d'IA pour la création musicale²⁵, et en particulier l'utilisation de techniques d'apprentissage profond [Briot et al., 2020], on peut considérer deux grandes approches :

- La première approche est constituée des générateurs autonomes. De premières startups et produits sont apparus à la fin des années 2010, par exemple Aiva et JukeDeck, ce dernier rapidement racheté par TikTok, illustrant ainsi le marché potentiel de génération de musique associée à des vidéos. La qualité de génération a progressé très vite avec la puissance de calcul.

Un exemple représentatif est la plateforme Udio apparue récemment²⁶. Udio utilise les techniques de requêtes (les « prompts », comme pour ChatGPT) pour personnaliser la génération. La qualité sonore du résultat est bluffante, si l'on compare avec les premières tentatives telles que JukeBox, d'Open AI, pourtant récentes (2020). La musique générée est courte (mais générée relativement rapidement) et il faut acquérir la version premium pour des morceaux plus longs. En cas de version vocale, Udio va générer des paroles inspirées par les mots de la requête, mais on peut alternativement conditionner la génération sur un texte.

Il s'agit d'une génération automatique « de bout en bout » à partir d'une requête textuelle et de quelques paramètres. On peut aussi demander un « remix » en modifiant certains paramètres ou/et la requête, mais il s'agit en fait d'une complète re-génération. Et surtout, il n'y a pas de moyen d'intervenir au niveau compositionnel, c'est-à-dire sur la mélodie ou/et l'harmonie. C'est un exemple typique et accompli d'automate paramétré

²⁵ Pour une étude toute récente sur le marché, les usages et les défis, commandée par la SACEM et son homologue allemande, voir [Goldhammer et al., 2024].

²⁶ Une plateforme analogue est Suno.

pour la génération de musique fonctionnelle, pour accompagner une vidéo, un documentaire, une publicité. Avec une qualité de son satisfaisante, mais peu de contrôle et peu d'originalité par rapport aux (nombreux) originaux qui lui ont servi d'inspiration, qu'une oreille exercée peut reconnaître assez rapidement.

- La deuxième approche, que je considère bien plus intéressante, en tant qu'informaticien mais aussi en tant que musicien, ce sont les assistants à la création musicale. Il ne s'agit plus cette fois d'une génération de bout en bout, sans aucune interactivité avec le musicien, mais au contraire d'outils ou/et d'environnements interactifs de support au travail du musicien.

Le prototype FlowComposer, développé par François Pachet et son équipe dans le cadre du projet Flow Machines à Sony CSL-Paris [Pachet et al., 2021], est une excellente illustration de ces potentiels. Le musicien peut interactivement écrire et éditer une partition, solliciter s'il se souhaite FlowComposer pour lui proposer des esquisses de mélodie ou/et d'harmonie, inspirés par un style choisi (en sélectionnant tel ou tel corpus préexistant, par exemple les bossas novas de Tom Jobim) ; ou/et des complétions ou des complémentations, par exemple en régénérant des accords correspondant à une partie de mélodie qu'il a modifiée (en s'inspirant du même ou d'un autre corpus musical). L'intégration de contraintes aux chaînes de Markov permet de contrôler la génération, par exemple, terminer sur la même note qu'au début, éviter des notes trop longues, être conforme à l'harmonie, etc.²⁷ Enfin, il existe une facilité de pré-orchestration où l'on peut choisir parmi une base de sons et styles d'instruments (par exemple des lignes de basse), qu'on peut

²⁷ Une fonctionnalité très intéressante est la capacité de spécifier des bornes (min et max) à l'ordre des chaînes de Markov pour la génération, en pratique très utile pour contrôler un équilibre entre génération qui fait sens et risque de plagiat (par recopie de séquences du corpus) [Papadopoulos et al., 2016].

appliquer aux mélodies et accords en cours d'élaboration, pour pouvoir tester en préproduction le résultat²⁸.

Ces deux grandes approches ne sont pas strictes, et il existe heureusement un espace d'exploration par les musiciens²⁹. Un exemple intéressant est l'expérience documentée par le groupe d'électro-pop YACHT³⁰ pour la création de son album *Chain Tripping* de 2019, en collaboration avec l'équipe de R&D Magenta de Google, elle-même spécialisée dans les techniques d'IA générative pour la création artistique [Google, 2024]. Dans [Evans et al., 2019], la chanteuse du groupe détaille l'expérience et la méthode. Ils ont utilisé différentes architectures d'IA générative de Magenta pour : la base musicale (mélodie, accords et rythme), le son (synthèse) ; les paroles ; les images ; et jusqu'aux clips vidéo.

Ce qui est intéressant dans leur expérience, c'est qu'ils ont utilisé une méthodologie rigoureuse, ce qui permet de savoir de manière précise ce qui vient de l'IA et ce qui vient des créateurs humains. Pour ce qui est de la musique, ils ont utilisé leurs précédents albums comme seuls exemples d'entraînement, alors que pour les paroles, ils ont ajouté au corpus d'entraînement des paroles de chansons de chanteurs qu'ils apprécient. Ils ont ensuite généré des boucles musicales de 4 mesures. Ils ont alors procédé à une

²⁸ FlowComposer a été utilisé par différents musiciens pour réaliser un disque collectif [Skygge et al., 2018]. Fort malheureusement, ce prototype a été abandonné par Sony, suite au départ de François Pachet. Le prototype reconstruit au Japon, renommé FlowMachines, est accessible via Sony, mais n'est malheureusement qu'une très pâle copie de l'original.

²⁹ L'ouvrage [Miller, 2019] offre une analyse, notamment sous la forme d'entretiens, d'un grand nombre d'acteurs en matière de création artistique avec de l'IA. Il apporte ainsi un intéressant tour d'horizon de diverses pratiques d'insertion de l'IA dans diverses pratiques de création artistique (pas seulement en musique).

³⁰ Acronyme de « Young Americans Challenging High Technology ».

sélection parmi les boucles, puis des assemblages, en introduisant des transpositions, mais sans aucun ajout ni modification. Les décisions concernant l'orchestration – en pratique, l'assignation de telle ou telle ligne mélodique ou harmonique à la voix ou à un instrument synthétique – étaient purement humaines, ainsi que les arrangements et la production. L'IA est ainsi utilisée non pas dans une approche compositionnelle, par opposition aux approches de composition algorithmique³¹ ou par IA, mais pour une production de matériaux compositionnels élémentaires (des boucles de 4 mesures) et des matériaux sonores (et textuels et visuels).

Hormis, les générateurs de musique paramétrés de type « de bout en bout » cités plus haut, depuis quelques années on constate l'apparition de divers outils et plugins fondés sur l'IA, émanant de startups, permettant d'assister les musiciens pendant différentes phases de composition, par exemple en proposant une ligne de basse, mais principalement au niveau de la production sonore, par exemple pour le mixage, ou le mastering. Mentionnons aussi la séparation de sources, par exemple pour réutiliser une voix sans l'accompagnement, qui est longtemps restée un verrou technologique et qui est depuis résolue par des techniques d'IA de réseaux profonds.

Limites actuelles de l'IA générative

Un problème identifié pour le futur proche est le risque de dégénérescence d'un modèle appris, du fait de la présence croissante sur le web (et ainsi s'ajoutant au corpus original, produit humainement) de textes produits par des modèles d'IA. L'étude récente de [Shumailov et al., 2024] analyse ce risque réel

³¹ La composition algorithmique – la composition au moyen de méthodes formalisables – est une tradition ancienne, qui a débuté bien avant l'ordinateur (par exemple, avec le jeu de dés musical attribué à Mozart [Mozart, 1793]). Elle inclut la musique stochastique citée auparavant et d'autres approches, telles que les chaînes de Markov et les réseaux de neurones artificiels, mais également : les grammaires génératives, les règles de transition, les automates cellulaires, et les algorithmes génétiques [Nierhaus, 2010].

d'« effondrement du modèle », qui oublie la véritable distribution des données sous-jacentes et converge au fil des générations vers une très faible variance. Il s'agit d'une forme de dé-coïncidence qui ne re-coïncide plus.

Par ailleurs, une autre étude récente, de [Doshi et Hauser, 2024], analyse l'impact causal de l'IA générative sur la production d'histoires. Dans cette étude expérimentale (avec 293 auteurs et 600 évaluateurs, tous humains), certains des auteurs³² peuvent utiliser l'IA générative pour générer des idées (en pratique, 3 phrases générées par ChatGPT) pour créer une histoire. Les évaluateurs évaluent (chacun reçoit 6 histoires à évaluer) la créativité et les caractéristiques émotionnelles des histoires. L'analyse indique une augmentation de la nouveauté, et encore plus de la qualité, des histoires écrites avec l'aide de l'IA. De plus, elles sont évaluées comme plus agréables à lire, avec plus de surprises et plus d'humour. Par ailleurs, autant ces gains grâce à l'aide de l'IA sont significatifs pour les auteurs au départ les moins créatifs³³, elle ne modifie pas sensiblement les scores des auteurs évalués au départ comme les plus créatifs. Le dernier résultat concerne la similarité des histoires, avec une mesure cette fois quantitative³⁴, et indique que les histoires générées à l'aide d'IA³⁵ sont plus similaires les unes aux autres que les histoires écrites uniquement par des humains.

Ainsi, comme nous avons déjà noté plus haut, les techniques d'IA générative, en particulier de génération texte telles que ChatGPT, ont tendance à peu

³² Plus précisément, les auteurs sont répartis aléatoirement en 3 groupes : sans utilisation d'IA, avec aide par l'IA d'une seule idée, avec aide par l'IA de jusqu'à 5 idées.

³³ Les auteurs ont été précédemment classés selon un test de créativité, le Divergent Association Task (DAT) [Olson et al., 2024].

³⁴ Elle se base sur la similarité cosinus, mesure classique de similarité entre les mots respectifs de deux documents.

³⁵ Environ 9 auteurs sur 10 ayant la possibilité d'avoir l'aide de l'IA l'utilisèrent.

d'innovation³⁶. Elles ont par contre également tendance à certaines hallucinations³⁷. Un écrivain a récemment utilisé ces limites à son profit pour contribuer à l'écriture d'une histoire alternative sur l'empire romain.

Dans l'ouvrage « Si Rome n'avait pas chuté » [Doan, 2023], Raphaël Doan développe une uchronie sur un empire romain bénéficiant d'une révolution industrielle avant l'heure. Le scénario a été imaginé et pensé par l'historien, mais l'écriture et les illustrations ont été réalisées par différentes techniques d'IA générative. Un peu comme dans le cas de YACHT, l'auteur détaille dans l'introduction la façon dont il a travaillé et utilisé l'IA, à l'origine d'une part importante du contenu, généré de manière itérative, l'auteur conservant l'idée et l'intention originale ainsi que les décisions de lisser le texte d'un point de vue stylistique et d'ajuster le propos.

Dans l'entretien [Gabinari, 2023], Raphaël Doan explique : « L'IA m'a permis de me décentrer³⁸, en allant dans des directions auxquelles je n'aurais pas pensé. Par exemple, elle a spontanément mélangé l'histoire d'une figure comme Thomas Edison (1847–1931) à celle de grands personnages romains exécutés par les empereurs. Ce qui est impressionnant, c'est cette capacité à faire de bons rapprochements entre des choses qui n'ont pas été mises en relation auparavant. L'IA sert aussi de base pour une réflexion que je mène moi-même. En utilisant ce que l'on appelle les commentaires de l'historien, j'ai créé une forme de dialogue avec le logiciel pour donner ma vision en tant qu'être humain. »

³⁶ En se rappelant, voir l'analyse plus haut, que cette tendance à l'uniformisation des créations ne provient pas que de l'IA.

³⁷ Ou encore confabulations. Il s'agit de la génération d'une réponse fautive ou trompeuse, bien que présentée comme un fait certain.

³⁸ Dé-coïncider !

Par ailleurs, les illustrations générées par l'IA représentent des mosaïques ou sculptures antiques (imaginaires), par exemple, un groupe statuaire conservé au Musée national romain qui représente Néron montrant la machine à vapeur au Sénat. Cette dé-coïncidence historique est développée en grande partie à l'aide de l'IA (qui n'a pas de jugement de valeur ni de vérité).

Conclusion

On le voit, la technologie avance très vite, notamment boostée par la puissance de calcul et de mémoire, qui est le carburant de la technologie actuelle de l'apprentissage profond. Comme souvent, la technologie avance plus vite que les usages. Rappelons que, dans le cas de l'histoire de la peinture, l'irruption d'une nouvelle technologie, la photographie, capable de remplacer les peintures figuratives, a participé du mouvement de dé-coïncidence vers l'abstraction pour échapper à la compétition croissante. Il est encore trop tôt pour imaginer comment les différents arts vont pouvoir évoluer dans leur pratique pour s'adapter à l'utilisation de l'IA générative ou/et de créer de nouvelles niches. Il va donc nous falloir plus de recul pour voir comment les artistes vont pouvoir intégrer ces techniques dans leurs pratiques. Et s'en servir pour les aider à dé-coïncider et re-coïncider vers des créations originales et pertinentes. De manière symétrique, le rôle de l'humain reste pour le moment encore indispensable dans la dé-coïncidence de l'IA, qui on l'a vu, a elle-même une tendance structurelle à rester dans sa zone de confort, la voie à explorer semblant ainsi plus que jamais la synergie entre l'humain et l'IA.

Post-Avertissements

De manière tout à fait volontaire³⁹, nous n'avons pas abordé certaines questions dans ce texte, notamment :

- Les enjeux des droits d'auteur et de la juste rétribution des auteurs humains des données alimentant l'IA, et qui font l'objet de processus

³⁹ Cela pourrait faire l'objet d'autres analyses que ce chapitre déjà suffisamment étendu.

juridiques en cours d’instruction, ainsi que les conséquences sociales de la compétition par l’IA dans certaines professions (par exemple, les doubleurs de films) ;

- La question de la possibilité dans le futur d’une « IA générale ». Ce débat, très médiatisé, nous semble « tourner en rond », du fait du manque d’arguments fondés et de retours d’expérience suffisants⁴⁰. En cela, nous rejoignons la proposition d’Alan Kay, pionnier des ordinateurs personnels et de la programmation moderne : « The best way to predict the future is to invent it. »

Références

- [Beaty et al., 2015] Beaty, Roger E, Benedek, Mathias, Barry Kaufman, Scott, Silvia, Paul J., 2015, « Default and Executive Network Coupling Supports Creative Idea Production », *Scientific Reports*, 5:10964, <https://www.nature.com/articles/srep10964>
- [Boden, 2004] Boden, Margaret A., 2004, *The Creative Mind: Myths and Mechanisms*, Routledge
- [Boden, 1994] Boden, Margaret A., éditeur, 1994, *Dimensions of Creativity*, MIT Press
- [Briot et al., 2020] Briot, Jean-Pierre, Hadjeres, Gaëtan, Pachet, François-David, 2020, *Deep Learning Techniques for Music Generation*, Springer
- [Csikszentmihalyi, 1990] Csikszentmihalyi, Mihaly, 1990, *Flow – The Psychology of Optimal Experience*, Harper and Row

⁴⁰ Par contre, nous souscrivons pleinement aux efforts en cours pour aborder la question de la sécurité de l’IA (et les aspects associés : alignement sur les objectifs, préférences et éthiques humaines, gouvernance, etc.). Sur ce sujet, voir par exemple [Russell, 2019], qui résume les enjeux en une question : « Comment pouvons-nous conserver le pouvoir sur des entités plus puissantes que nous, pour toujours ? » [Russell, 2024].

- [Dehaene et al., 2017] Dehaene, Stanislas, Lau, Hakwan, Kouider, Sid, 2017, « What is Consciousness, and could Machines Have It? », *Science*, 358:486–492, octobre
- [Doan, 2023] Doan, Raphaël, 2023, *Si Rome n'avait pas chuté*, Passés/Composés
- [Doshi et Hauser, 2024] Doshi, Anil R., Hauser, Oliver P., 2024, « Generative AI Enhances Individual Creativity but Reduces the Collective Diversity of Novel Content », *Science Advances*, 10(28):eadn5290, juillet, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4535536
- [Eapen, et al., 2023] Eapen, Tojin T., Finkenstadt, Daniel J., Folk, Josh, Venkataswamy, Lokesh, 2023, « AI And Machine Learning How Generative AI Can Augment Human Creativity – Use it to Promote Divergent Thinking », *Harvard Business Review*, juillet-août, <https://hbr.org/2023/07/how-generative-ai-can-augment-human-creativity>
- [Elgammal et al., 2017] Elgammal, Ahmed, Liu Bingchen, Elhoseiny, Mohamed, Mazzone, Marian, 2017, *CAN: Creative Adversarial Networks Generating “Art” by Learning about Styles and Deviating from Style Norms*, arXiv:1706.07068, <https://arxiv.org/abs/1706.07068>
- [Evans et al., 2019] Evans, Claire, Roberts, Adam, Engel, Jesse, 2019, *Music and Machine Learning*, Google I/0, https://www.youtube.com/watch?v=pM9u9xcM_cs&t=1378s
- [Gabinari, 2023] Gabinari, Pauline, 2023, « J’ai créé un dialogue avec l’IA : Comment un historien a coécrit son roman avec ChatGPT », *Télérama*, mai, <https://www.telerama.fr/livre/j-ai-cree-un-dialogue-avec-l-ia-comment-un-historien-a-coecrit-son-roman-avec-chatgpt-7015401.php>
- [Goldhammer et al., 2024] Goldhammer, Klaus, Birkel, Mathias, Mackuth, Lena, Komma, Daniel, 2024, *AI and Music – Market Development of AI in the Music Sector and Impact on Music Authors and Creators in Germany and France*, Goldmedia–SACEM–Gema, <https://www.gema.de/en/news/ai-study>
- [Goodfellow et al., 2016] Goodfellow, Ian, Bengio, Yoshua, Courville, Aaron, 2016, *Deep Learning*, MIT-Press
- [Google, 2024] Google AI, 2024 (consulté le 18/10/2024), *Magenta – Make Music and Art using Machine Learning*, Google AI, <https://magenta.tensorflow.org/>

- [Guéreau, 2023] Guéreau, Etienne, 2023, *James Bond et l'effondrement musical*, <https://www.youtube.com/watch?v=NSZB4tQClk0>
- [Jullien, 2017] Jullien, François, 2017, *Dé-coïncidence – D'où viennent l'art et l'existence ?*, Grasset
- [Kahneman, 2012] Kahneman, Daniel, 2012, *Système 1/Système 2 : Les deux vitesses de la pensée*, Flammarion
- [Koontz, 2019] Koontz, Alison, 2019, « The Circuitry of Creativity: How Our Brains Innovate Thinking », *Caltech Letters*, mars
- [Lenat et Seely Brown, 1984] Lenat, Douglas, Seely Brown, John, 1984, « Why AM and Eurisko Appear to Work », *Artificial Intelligence*, 23(3):269–294, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/000437028490016X>
- [Lenat, 1976] Lenat, Douglas Bruce, 1976, *AM: An Artificial Intelligence Approach to Discovery in Mathematics as Heuristic Search*, PhD thesis, Stanford University
- [Limb et Braun, 2008] Limb, Charles, Braun, Allen R., 2002, « Neural Substrates of Spontaneous Musical Performance: An fMRI Study of Jazz Improvisation », *PLoS One*, 3:1–9, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001679>
- [McCarthy et al., 2006] McCarthy, John, Minsky, Marvin L., Rochester, Nathaniel, Shannon, Claude E., A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955, *AI Magazine*, 27(4):12, hiver, <https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904>
- [Metz, 2016] Metz, Cade, 2016, « Google's AI Wins Pivotal Second Game in Match with Go Grandmaster », *Wired*, mars, https://www.wired.com/2016/03/googles-ai-wins-pivotal-game-two-match-go-grandmaster/?mbid=nl_31016
- [Miller, 2019] Miller, Arthur I., 2019, *The Artist in the Machine – The World of AI-Powered Creativity*, MIT Press
- [Mozart, 1793] Mozart, Wolfgang Amadeus, 1793, *Instruction – Pour composer autant de Walzer ou Schleifer que l'on veut, par le moyen de deux: Dès sans savoir la musique ou la composition*, N. Simrock
- [Nierhaus, 2010] Nierhaus, Gerhard, 2010, *Algorithmic Composition: Paradigms of Automated Music Generation*, Springer

- [O'Connor, 2022] O'Connor, Ryan, 2022, *Introduction to Diffusion Models for Machine Learning*, AssemblyAI, <https://www.assemblyai.com/blog/diffusion-models-for-machine-learning-introduction/>
- [Olson et al., 2024] Olson, Jay A., Webb, Margaret E., Cropper, Simon J., Langer, Ellen J., 2024 (consulté le 18/10/2024), *Divergent Association Task: Fast Creativity Test*, <https://www.datcreativity.com/>
- [Oudeyer et al., 2007] Oudeyer, Pierre-Yves, Kaplan, Frédéric, Hafner, Verena V., 2007, « Intrinsic Motivation Systems for Autonomous Mental Development », *Transactions on Evolutionary Computation*, 11(2):265–286, IEEE, Doi:10.1109/TEVC.2006.890271
- [Pachet et al., 2021] Pachet, François, Roy, Pierre, Carré, Benoît, 2021, « Assisted Music Creation with Flow Machines: Towards New Categories of New », In Miranda, Eduardo Reck, éditeur, *Handbook of Artificial Intelligence for Music – Foundations, Advanced Approaches, and Developments for Creativity*, Springer, pages 485–520
- [Papadopoulos et al., 2016] Papadopoulos, Alexa, Pachet, François, Roy, Pierre, 2016, « Generating non-Plagiaristic Markov Sequences with Max Order Sampling », In Degli Esposti, Mirko, Altmann, Eduardo G., Pachet, François, éditeurs, *Creativity and Universality in Language*, Springer, pages 85–103
- [Percino et al., 2014] Percino, Gamaliel, Klimek, Peter, Thurner, Stefan, 2014, « Instrumentational Complexity of Music Genres and Why Simplicity Sells », *PLoS One*, 9(12): e115255
- [Rosa, 2018] Rosa, Hartmut, 2018, *Résonance – Une sociologie de la relation au monde*, La Découverte
- [Runco, 2023] Runco, Mark A., 2023, « AI Can Only Produce Artificial Creativity », *Journal of Creativity*, (33)3:100063, <https://doi.org/10.1016/j.yjoc.2023.100063>
- [Runco et Garrett, 2012] Runco, Mark A., Garrett, J. Jaeger, 2012, « The Standard Definition of Creativity », *Creativity Research Journal*, 24(1):92–96
- [Russell, 2024] Russell, Stuart, 2024, « AI: What if We Succeed? », *Paris AI Safety Symposium*, octobre, <https://sites.google.com/view/paiss2024/schedule>
- [Russell, 2019] Russell, Stuart, 2019, *Human Compatible – Artificial Intelligence and the Problem of Control*, Allen Lane

- [Salganik et al., 2006] Salganik, Matthew J., Sheridan Dodds, Peter, Watts, Duncan J., 2006, « Experimental Study of Inequality and Unpredictability in an Artificial Cultural Market », *Science*, 311:854–856
- [Schoenberg et Stein, 2010] Schoenberg, Arnold, Stein, Leonard, éditeur, 2010, *Style and Idea – Selected Writings, 60th Anniversary Edition*, University of California Press
- [Schönberg, 1978] Schönberg, Arnold, 1978, *Theory of Harmony*, Faber & Faber
- [Schonberg, 2010] Schoenberg, Arnold, 2010, *Style and Idea – Selected Writings, 60th Anniversary Edition*, Leonard Stein, éditeur, University of California Press
- [Serrá et al., 2012] Serrá, Joan, Corral, Alvaro, Boguñá, Corral, Haro, Martín, Arcos, Josep L., 2012, « Measuring the Evolution of Contemporary Western Popular Music », *Scientific Reports*, 2:521, Nature, Doi: 10.1038/srep00521
- [Shumailov et al., 2024] Shumailov, Ilia, Shumaylov, Zakhar, Zhao, Yiren, Papernot, Nicolas, Anderson, Ross, Gal, Yarin, 2024, « AI Models Collapse when Trained on Recursively Generated Data », *Nature*, 631:755–759, juillet, <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07566-y>
- [Siegel, 2009] Siegel, Robert, 2009, « The Loudness Wars: Why Music Sounds Worse », NPR, décembre, <https://www.npr.org/2009/12/31/122114058/the-loudness-wars-why-music-sounds-worse?sc=nl&cc=mn-20100102>
- [Skygge et al., 2018] Skygge et al., 2018, *Hello World Album – the First Album Composed with an Artificial Intelligence*, Flow Records, <https://www.helloworldalbum.net/>
- [Turing, 1950] Turing, Alan, M., 1950, « I. Computing Machinery and Intelligence », *Mind*, Volume LIX, 236:433–460, <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>
- [Varela et al., 1992] Varela, Francisco J., Thompson, Evan, Rosch, Eleanor, 1992, *The Embodied Mind – Cognitive Science and Human Experience*, MIT Press
- [Xenakis, 1992] Xenakis, Iannis, 1992, *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition: Thoughts and Mathematics in Composition*, Pendragon