



## Recherche et intelligence artificielle



Ce numéro 147 de *Culture & Recherche* explore avec un regard distancié les avancées technologiques (outils) de l'Intelligence artificielle (IA) et présente leur impact sur les pratiques de la recherche Culture. L'IA est à la fois un champ de recherche et un accélérateur de découvertes scientifiques. Tous les domaines de la recherche culturelle sont concernés (création artistique, architecture et urbanisme, patrimoines et biens culturels, archéologie, archives et bibliothèques, musées, industries culturelles et créatives), car l'IA est devenue un domaine de recherche pluridisciplinaire, en pleine transformation théorique et méthodologique, et qui soulève de nombreux enjeux scientifiques, éthiques, épistémologiques, environnementaux et sociétaux.

L'IA imprègne depuis plusieurs décennies l'ensemble de la société et des usages dans de nombreux secteurs. Entre peur et fascination (humain *versus* IA ; risques *versus* opportunités), elle suscite des changements radicaux, notamment pour la recherche. Portée tant par les États que par les acteurs privés, elle modifie aussi profondément nos rapports aux autres.

Elle est définie par le Parlement européen comme tout outil utilisé par une machine capable de « reproduire les processus cognitifs humains, tels que le raisonnement, la planification et la créativité ». L'approche européenne s'articule autour des principes qui doivent régir une IA « digne de confiance », « légale », « éthique » et « robuste ».

Les scientifiques s'accordent pour dire que l'IA se développe dès les années 1950. Depuis, différents jalons ont ponctué son développement, en lien avec la maîtrise des données et la puissance de calcul, jusqu'à rencontrer le grand public avec des « agents conversationnels » de type ChatGPT (*Generative pre-trained transformers*) en 2022.

Dès les années 2010, les institutions patrimoniales se sont mobilisées pour expérimenter de nouveaux usages. Depuis, la stratégie nationale pour l'intelligence artificielle, lancée en 2018, a retenu cinq priorités : la création d'un réseau académique d'instituts d'excellence en IA ; le soutien à des chaires d'excellence en IA ; le financement de programmes doctoraux ; la mise à disposition du supercalculateur Jean Zay ; la mise en œuvre d'un programme et équipement prioritaire de recherche en IA (PEPR IA). Souveraineté et progrès social (confiance, inclusion, intégrité scientifique et transparence, science ouverte, justice, qualité de vie, durabilité des modèles, frugalité, etc.) sont dès lors autant de valeurs à défendre. Le 13 mars 2024, l'Europe est la première à légiférer avec l'adoption du règlement sur l'IA.

Dans ce contexte, trois axes transversaux ont été retenus :

- susciter de nouveaux usages d'intelligence collective en impulsant de nouvelles méthodologies pour des connaissances exponentielles, en s'emparant des processus de création et du dialogue humain-machine ;
- conscientiser l'impact de l'IA sur les méthodes d'enseignement et de recherche en expérimentant de nouveaux modes de production et de transmission de la recherche Culture avec une boîte à outils innovants ;
- se positionner face aux enjeux et défis en s'emparant de la culture du risque et du principe de précaution.

Je remercie chaleureusement les autrices et auteurs de ce numéro. ■

## NOËL CORBIN

Délégué général à la transmission, aux territoires et à la démocratie culturelle



© MC-Didier Plovy

# Recherche et intel

1 Édito,  
Noël Corbin, Délégué général  
à la transmission, aux territoires  
et à la démocratie culturelle

4 Préface,  
C. Graindorge



## 6-49

### Susciter de nouveaux usages d'intelligence collective

### 8-24 Impulser des méthodologies pour des connaissances exponentielles

8 Intelligences humaine, collective et artificielle dans le chantier scientifique et de restauration de Notre-Dame de Paris,  
L. De Luca, A. Guillem et K. Réby

13 L'IA et les nouvelles technologies à la rescousse de la lutte contre le trafic de biens culturels,  
C. Chastanier et A. Kerep

17 L'innovation au service de la lutte contre le pillage et le trafic des biens culturels: le cas du projet européen ANCHISE et la place d'ICONEM,  
T. Bartette, V. Chankowski et I. Zaitsev

20 Le projet HikarIA: étude et mise en valeur du patrimoine photographique par l'intelligence artificielle,  
É. de Saint-Ours et C. Kermorvant

## 25-38

### S'emparer des processus de création

25 *Hyperphantasia.*  
Des origines de l'image,  
J. Emard

29 Pour une théorie visuelle des arts génératifs interactifs,  
G. Prangé

32 Pour une intelligence artificielle responsable au service d'une création musicale, inventive et diverse,  
F. Bévilacqua, J.-L. Giavitto, F. Madlener, N. Obin, A. Roebel et P. Saint-Germier

34 Le langage des partitions musicales face à l'intelligence artificielle,  
L. Bigo, M. Keller et D.-V.-T. Le

36 *The Cloud:*  
une œuvre instantanée,  
A. Chemla-Romeu-Santos, I. Dobričić et A. Zaides

## 39-49

### Générer un dialogue humain-machine

39 Interpréter, orienter, répondre. La mise en œuvre d'un outil conversationnel (*chatbot*) pour faciliter l'accès aux archives: l'exemple des recherches sur l'Algérie,  
B. Chastagner

41 Les assistants intelligents vont-ils changer les habitudes de recherche des utilisateurs dans les bibliothèques?,  
J.-P. Moreux et A. Tang

43 Sélectionner, épurer, décrire. L'apport de l'IA dans le traitement archivistique des messageries électroniques,  
T. Ait El Mekki et B. Grailles

46 Et si je demandais à ChatGPT? Commentaires sur l'utilisation de l'IA en milieu professionnel,  
A. Conraux

48 L'IA générative dans l'administration: une stratégie d'innovation de l'État,  
U. Tan



## 50-109

### Conscientiser l'impact de l'IA sur les méthodes d'enseignement et de recherche

## 52-64

### Opérer dans un nouveau mode de transmission

52 AI4LAM: une communauté pour l'intelligence artificielle dans les bibliothèques, archives et musées,  
E. Bermès

55 eScriptorium et l'IA pour la transcription automatique,  
M. Bui, C. Brisson, A. Chagué, F. Constant, P. Stokes et D. Stökl Ben Ezra

58 L'intelligence artificielle au service du traitement des archives: l'exemple du projet SIMARA,  
J.-F. Moufflet

61 Les minutes des tabellions normands (xiv<sup>e</sup>-xvii<sup>e</sup> siècles) et l'intelligence artificielle: le projet TabelNorm, M. Groult et L. Scordia

62 Les nouvelles technologies à l'École nationale supérieure d'art et de design de Limoges (ENSAD Limoges): un outil pour la création,  
D. de Boissésou et A. Schacherer

# Intelligence artificielle

65-89

## Concevoir une production de recherche

- 65 Les instruments de la conception : vers un cadre théorique de la co-créativité computationnelle, *P. Marin*
- 68 Architecture et intelligence artificielle : quels enjeux ?, *C. Duclos-Prévet, F. Guéna, É. Hochscheid, X. Marsault et J. Silvestre*
- 72 Potentialités de l'intelligence artificielle pour l'architecture : le laboratoire Modèles pour l'Architecture et le Patrimoine (MAP), *C. Duclos-Prévet, F. Guéna, É. Hochscheid, X. Marsault et J. Silvestre*
- 74 Exploration de l'intelligence artificielle générative dans la pédagogie en architecture, *R. Ayoubi, L. Lescop et A. Mangasaryan*
- 79 L'IA, un enjeu pédagogique pour les écoles d'architecture, *P. Terracol*
- 82 L'IA vecteur d'évolution des métiers et des compétences, *A. Ben Saci, P. Marin et D. Wolle*
- 86  Institut multidisciplinaire et intelligence artificielle, activités de recherche, de formation et d'innovation, *K. Thang Nguyen*
- 87 Comment l'IA transforme l'analyse des images de la ville, *B. Beaucamp*

90-109

## Construire une boîte à outils

- 90 Le Consortium-HN pictoria : explorer la culture visuelle avec l'intelligence artificielle, *J.-P. Moreux, J. Schuh et A.-V. Szabados*
- 95 L'intelligence artificielle au service des patrimoines et de l'archéologie : une mutation en marche, *T. Sagory et ChatGPT-4*

98 L'IA et la télédétection LiDAR.

Un exemple d'application à la prospection archéologique en Bretagne, *A. Guyot, L. Hubert-Moy, M. Lennon et T. Lorho*

102 DIANet, un outil pour l'identification automatique des coins monétaires à partir d'images 3D,

*M. Bui, K. Gruel et O. Masson*

106 ArchéoBot : une IA conversationnelle pour l'enseignement de l'archéologie,

*V. Capozzoli, A. Duploux et G. Simiand*



110-133

## Se positionner face aux enjeux et défis

112-120

## S'emparer de la culture du risque et du principe de précaution

- 112 Perspectives de cybersécurité des systèmes d'intelligence artificielle dans les secteurs culturels, *N. Marcel-Millet*
- 115 Droit d'auteur et IA générative : vers une éthique de la transparence, *D. Pouchard*
- 118 Normes harmonisées en IA : sciences et techniques au service de la réglementation européenne, *L. Aufrant*

121-133

## (Re)mobiliser l'intelligence humaine

- 121 L'intelligence artificielle et nous, *L. Chicoineau*
- 124 Explorer la culture par le truchement de l'intelligence artificielle, *J.-G. Minel*
- 126 Les technologies des langues : un secteur stratégique pour des IA souveraines, compétitives et respectueuses de nos langues en France et en Europe, *T. Grouas*
- 129  Analyse de texte et traitement automatique du langage. Retour sur un projet de fouille automatisée de données dans les bilans d'activité des services publics d'archives, *B. Chastagner*
- 130 L'IA et l'écologie. Les micro-réseaux électriques « intelligents », *R. Oulhaj*

Dossier coordonné par

CATHERINE GRAINDORGE

Rédactrice en chef, Délégation générale à la transmission, aux territoires et à la démocratie culturelle, Sous-direction des formations et de la recherche, Bureau de la recherche

En couverture



La ville à l'heure du changement climatique – surréalisme migratoire  
© EnsaNantes – UET Algoarchi

# Naviguer dans « l'océan IA » pour une meilleure capitalisation de l'intelligence humaine

CATHERINE GRAINDORGE

Rédactrice en chef, Délégation générale  
à la transmission, aux territoires  
et à la démocratie culturelle,  
Sous-direction des formations  
et de la recherche

Si l'Intelligence artificielle (IA) irrigue d'ores et déjà tous nos champs d'activités, les différentes formes d'IA, leurs potentialités et leurs évolutions les plus récentes sont encore largement méconnues par les citoyens. Dans ce contexte, la recherche doit pouvoir endosser un rôle essentiel d'explicitation, de transmission, de formation et de nécessaire distanciation.

### Flux et reflux

Invention issue de la recherche (physique et mathématiques), l'IA puise son ancrage, d'une part, dans le développement des systèmes de logique formelle, capables de représenter des idées et des concepts (dès le XIX<sup>e</sup> siècle) et, d'autre part, dans la fabrication des premiers ordinateurs programmables, pouvant réaliser des calculs stockés dans une mémoire (dès les années 1940). Ces premiers ordinateurs devaient pouvoir reproduire les fonctions cognitives humaines simples (travaux du mathématicien et cryptologue Alan Turing sur la capacité d'une machine à imiter une conversation). S'ensuivra, dans les années 1980, l'émergence de l'apprentissage automatique des algorithmes ou « apprentissage machine » (*Machine learning*). À partir des années 2000, l'augmentation de la puissance de calcul, en lien avec une maîtrise croissante des données, offre de nouvelles capacités et potentialités.

On distingue ainsi aujourd'hui « l'IA symbolique » (réseaux neuronaux et « systèmes experts »), qui permet de structurer des connaissances en s'appuyant sur une suite de règles, de « l'IA d'apprentissage automatique » qui repose sur « l'apprentissage machine » et peut reproduire un certain nombre de tâches à partir de données et de statistiques. L'IA dite

« générative » est un domaine de « l'IA d'apprentissage » : elle est capable de générer automatiquement des contenus (texte, image, son, vidéo, etc.) à la suite d'instructions formulées par l'utilisateur : on parle alors d'*invite* ou de *prompt*. Elle fonctionne en apprenant à partir d'un très grand nombre d'exemples qu'on nomme « données d'entraînement ». Elle est principalement basée sur une conception statistique du langage : son but est de prédire avec la probabilité la plus élevée le mot suivant, indépendamment de toute capacité de prise de conscience ou de compréhension du contexte.

Si l'« IA générative » n'est donc pas « intelligente », ce qu'elle peut réaliser est d'importance. Mais aujourd'hui encore, les impacts sur le processus cognitif humain et ses usages ne sont pas systématiquement investigués. D'aucuns prédisent à l'avenir une « IA forte » ou « générale », dotée d'une intelligence et d'une « conscience » capables de surpasser l'humain dans ses travaux intellectuels et ses pratiques de recherche...

### Prendre la vague

Dans ce contexte, de nombreux États ont mis en place récemment des « plans nationaux » pour l'IA. La France a lancé sa première Stratégie nationale pour l'intelligence artificielle (SNIA) en mars 2018, retenant cinq axes, dont les deux premiers sont la recherche et l'enseignement supérieur. Ces deux volets de la SNIA ont fait l'objet d'une évaluation et de recommandations, parmi lesquelles celles de « prévoir les besoins en enseignants du secondaire, enseignants-chercheurs et en chercheurs formés à l'usage de l'IA », « d'établir des plans de formation en adéquation » et d'« élaborer une carte et un catalogue de bonnes pratiques ». Cette démarche, destinée à susciter et à maîtriser de nouveaux usages d'intelligence collective, trouve des expressions plurielles dans la recherche Culture.

Avec les travaux sur l'*unicum* Notre-Dame de Paris, on peut désormais parler de « projet IA global » tant les apports de connaissances, en un temps record, sont immenses : chantier

scientifique interdisciplinaire, approche anthropologique et historique, pratiques réflexives pour le tandem restauration-recherche, strates archéologiques et stratigraphies de connaissances, corps-à-corps métiers-bâtiment et, enfin, patrimoine culturel immatériel (émotions, ambiances sonores, etc.).

En analysant ainsi des volumes colossaux de données issues de travaux scientifiques mis en commun, l'IA peut être au service de l'expertise humaine. Elle est aussi un outil performant avec ses puissantes capacités de reconnaissance visuelle pour protéger les biens culturels de sources nombreuses de destruction ou de « disparition » (urgence climatique, pillages et dégradations – notamment sur les terrains de guerre – et trafic illicite des œuvres qui peuvent être « tracées »). Le traitement par l'IA de grands corpus visuels autres (collections de musées, données du Centre national de préhistoire) permet non seulement d'approfondir l'analyse des collections en facilitant des études quantitatives et qualitatives (description et catégorisation des corpus), mais aussi d'incrémenter de nouvelles données inédites (conservation, mise en valeur) et de générer un processus de création d'œuvre (arts visuels, création musicale). Pour s'emparer des processus de création avec des méthodologies qui mobilisent des algorithmes tout en restant au service du projet singulier, la transparence des données utilisées pour « l'apprentissage machine » (*Machine learning*) et la transparence des usages (informer que l'IA est utilisée) sont des préalables indispensables.

Dans ce contexte, générer un dialogue humain-machine (*chatbot*), destiné à rendre accessibles des données, à orienter l'utilisateur dans sa recherche et à analyser les pratiques de recherche contribue à accompagner le chercheur dans sa quête sélective de sources pertinentes et catégorisées. De là à modifier des habitudes de recherche? Les assistants de conversation évoluent de plus en plus en « personnalisant » les échanges au fil de la conversation et des requêtes formulées par le chercheur. Celles-ci fournissent

à la structure de recherche œuvrant avec ces outils de précieuses informations sur les usages des utilisateurs (archives, bibliothèques). L'IA utilisée pour sélectionner et épurer est déjà bien installée pour les contenus textuels. Ces capacités sont peu à peu utilisées dans l'ensemble des milieux professionnels, notamment les administrations, en s'introduisant dans le quotidien de tâches répétitives et chronophages. Alors que le ministère de la Culture a publié une *Charte interne relative à l'intelligence artificielle générative. Pour un usage responsable de l'intelligence artificielle* en juin 2024, l'intelligence artificielle est expérimentée dans les services publics depuis près d'un an (projet Albert). Tous ces usages sont corrélés à une forte volonté de maîtriser leurs limites.

Dans toutes ces approches, la communauté mobilisée est très large (chercheurs, experts métiers et savoirs-faire, universités et établissements de recherche en France et à l'étranger, start-up, forces de l'ordre) et ancrée dans un réseau d'utilisateurs. Portant ainsi une dimension sociale et éthique, ces technologies de l'IA constituent un « commun » adaptable et répliquable dans d'autres domaines d'application.

### Au milieu du gué

Ainsi, dans l'écosystème de l'enseignement supérieur et de la recherche, les retours d'expériences sont suffisamment éloquents pour conscientiser l'impact de l'IA sur les méthodes pédagogiques. Car il existe déjà une structuration de communautés opérant dans un nouveau mode de transmission basé sur « l'apprentissage machine » et sa plus-value, la science ouverte : communautés des ressources et des canaux de diffusion de la recherche (archives, bibliothèques, musées, humanités numériques), communautés numériques de la transcription automatique de sources patrimoniales et archivistiques, communautés d'enseignants et de chercheurs pour la création artistique et l'architecture. L'acte de co-concevoir une production avec l'IA peut d'ores et déjà s'inscrire dans cette exploration des données : élaboration d'un support de cours et d'un programme pédagogique, adaptation d'un enseignement aux besoins individuels, développement d'un sens critique, d'une pensée conceptuelle artistique. Si les processus cognitifs humains sont ici bousculés, une nouvelle pédagogie, qui s'appuierait sur la confrontation de multiples hypothèses formulées par le collectif et des pratiques d'évaluation, semble décisive pour que l'innovation prenne sa source dans une diversité de cultures (découvrabilité des contenus et multilinguisme) et de modes de pensée (inclusion et diversité).

Cette créativité computationnelle est déjà ancienne. Depuis les premières machines à dessiner et les méthodes d'encodage du langage, ce *continuum* expérimental a permis de développer

tout un écosystème destiné à matérialiser des connaissances. Mais deux questionnements surgissent : que faut-il enseigner et comment l'enseigner ? La maîtrise des agents conversationnels repose autant sur une hiérarchisation des idées et un apprentissage sur la vérification des données que sur l'amélioration de l'expression textuelle et la fabrication de visuels produits selon une instruction (*prompt*), autre manière de travailler sur le vocabulaire et sur les résultats que les étudiantes et étudiants souhaitent obtenir. Cette acculturation progressive ne doit pas conduire à des schémas de recherche « lissés », mais plutôt à des solutions différenciées qui intègrent les défis les plus prégnants (environnementaux et plus largement sociétaux).

Trois usages croissent : des IA spécifiques ; des larges modèles de langage (*Large language model* – LLM) qui reposent sur une consigne (*prompt*) ; des IA générales mais « adaptées » à la spécificité des champs disciplinaires (exemple des IA de génération d'images). Les interactions entre l'IA, la conception et la création, les industries culturelles et créatives deviennent un propre champ de recherche (cartographie des usages et cartographie sensible). Cette recherche exploratoire est une pratique indispensable pour servir les fondamentaux d'encapacitation : expérimenter pour apprendre, analyser et inventer.

Le besoin de formation des communautés enseignante et étudiante est immense face à la transformation des métiers et des compétences induite par l'IA. Quatre leviers existent : le programme « Compétences et métiers d'avenir, France 2030 », la trilatérale renforcée « recherche-formation-innovation », les centres de ressources, d'accompagnement, de mise à disposition et d'exploration des outils d'IA visuelle pour les sciences humaines et sociales et les IA conversationnelles (*chabots*) spécifiques qui confrontent enseignants et étudiants à des modes de transmission et d'apprentissage multimodaux.

### Veiller au grain

L'évaluation de la pertinence des usages de l'IA, alliée à une (re)mobilisation de l'intelligence humaine dans des délais désormais contraints, est une gageure. Car l'IA peu ou mal maîtrisée génère de nouvelles formes de vulnérabilité. Il s'agit dès lors de développer une culture du principe de précaution et de la souveraineté, en investiguant un spectre très large de risques (cybersécurité, intégrité scientifique, droits d'auteur, diversité et inclusion, écologie...).

Les enjeux de cybersécurité de, par, et face à l'IA portent principalement sur les systèmes d'IA (empoisonnement des données), l'utilisation de l'IA pour renforcer la cybersécurité (attaque des infrastructures numériques) et les mésusages malveillants (imitation d'actions

humaines, hypertrucage ou *deepfakes*). Des points de vigilance relatifs à l'intégrité scientifique portent ainsi sur la fiabilité des systèmes d'IA (pour éviter le risque de falsification des contenus scientifiques), la protection des données personnelles glissées dans les requêtes des chercheuses et chercheurs, enfin, la propriété intellectuelle des contenus générés par l'IA avec des données d'entraînement protégées par un copyright. Il ne s'agit pas ici de créer de nouvelles règles de propriété intellectuelle. Les travaux du Conseil supérieur de la propriété littéraire et artistique (CSPLA) et de la commission de l'intelligence artificielle ont donné un cadre juridique et des conditions de mise en œuvre autant pour les développeurs de modèles d'IA que pour les ayants droit. En corollaire, des comités produisent des normes harmonisées en IA, véritables spécifications techniques au service de la réglementation européenne : *Artificial Intelligence Act* est la première législation générale au monde sur l'IA entrée en vigueur depuis août 2024 dont l'impact sociétal et économique s'annonce colossal. La commission européenne retient sept exigences pour cette IA de confiance : action humaine et contrôle humain ; robustesse et technicité ; respect de la vie privée et gouvernance des données ; transparence ; diversité, non-discrimination et équité ; bien-être sociétal et environnemental ; responsabilité.

### Garder le cap

Ces exigences requièrent des débats avec le grand public pour une culture de l'innovation structurée par le partage des savoirs. Adopter une approche critique et collaborative, impliquant les communautés de la recherche Culture, est à même de créer des synergies entre l'imaginaire collectif, les attentes des citoyens, l'intégrité des expressions humaines et les futurs encore inconnus de l'IA. ■

#### Quelques ressources :

<https://www.vie-publique.fr/rapport/37225-donner-un-sens-intelligence-artificielle-pour-une-strategie-nation>

<https://www.ccomptes.fr/fr/plateformes-citoyennes/plateforme-evaluations-politique-publique/explorer-evaluations/lintelligence>

<https://www.bercynumerique.finances.gouv.fr/le-rapport-ia-notre-ambition-pour-la-france>

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/la-strategie-francaise-en-intelligence-artificielle-49166>

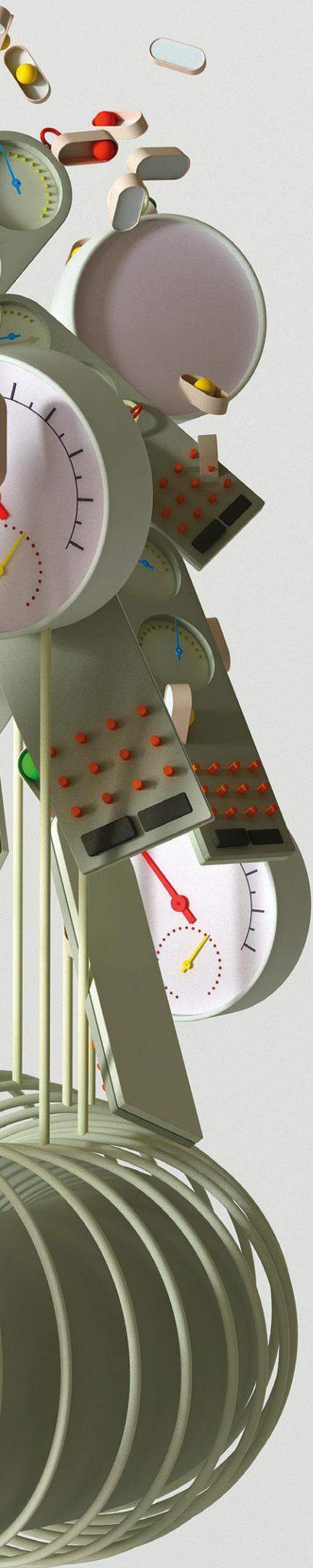
<https://www.ofis-france.fr/lintegrite-scientifique-dans-la-loi/>

<https://abes.fr/publications/revue-arabesques/arabesques-107/>

<https://hal.science/hal-04359466>

(sites consultés le 18 octobre 2024).





# Susciter de nouveaux usages d'intelligence collective

*Le temps est compté, juillet 2023*

[https://www.pexels.com/fr-fr/photo/  
abstrait-technologie-recherche-  
energie-17485607](https://www.pexels.com/fr-fr/photo/abstrait-technologie-recherche-energie-17485607)

## Intelligences humaine, collective et artificielle dans le chantier scientifique et de restauration de Notre-Dame de Paris

L'incendie de Notre-Dame de Paris en 2019 a initié une aventure scientifique interdisciplinaire exceptionnelle, transformant l'interaction entre ce monument emblématique et les études multidisciplinaires en un puissant vecteur de production de savoirs collectifs<sup>1</sup>. Cette initiative mobilise des spécialistes de divers domaines – archéologie, anthropologie, architecture, histoire, chimie, physique, informatique – pour élaborer un corpus de données qui reflète les pratiques scientifiques actuelles dans l'étude du patrimoine à l'ère numérique.

### LIVIO DE LUCA

Directeur de recherche CNRS, Unité propre de recherche (UPR) 2002, Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine (MAP)

### ANAÏS GUILLEM

Ingénieure de recherche UPR 2002 MAP CNRS

### KÉVIN RÉBY

Chercheur post-doctoral UPR 2002 MAP CNRS

La démarche entreprise par le groupe de travail « données numériques » du chantier scientifique dépasse la simple numérisation de l'objet physique pour embrasser une connaissance approfondie de celui-ci, explorant la manière dont les caractéristiques matérielles et les savoirs associés se nourrissent mutuellement (ill. ci-contre, en haut).

Nous nous attachons à documenter et à déchiffrer les démarches scientifiques multidisciplinaires, en éclairant la manière dont divers acteurs produisent, utilisent et interconnectent les données numériques en rapport avec leurs sujets d'étude. L'enjeu est de révéler la nature de la connaissance émergente, ses spécificités disciplinaires et ses liens avec les attributs des objets analysés. Il s'agit d'un contexte pertinent pour interroger les relations entre les intelligences humaine, collective et artificielle.

### L'intelligence artificielle

La définition de l'Intelligence artificielle (IA) a évolué depuis les années 1950 en fonction des avancées techniques et informatiques. Selon Marvin Minsky, l'un des pionniers du domaine, l'IA peut être définie comme « la science de faire faire à des machines des choses qui demanderaient de l'intelligence si elles étaient faites par des humains<sup>2</sup> ». Cette définition souligne l'objectif principal de l'IA : reproduire les capacités cognitives humaines grâce à des systèmes informatiques.

Pour John McCarthy<sup>3</sup>, un autre des fondateurs de l'IA en tant que domaine scientifique, il existe deux volets principaux : l'un épistémologique et l'autre

heuristique. Le volet épistémologique se concentre sur la façon d'examiner la manière dont les faits peuvent être représentés dans un système d'IA et les règles et la logique qui permettent de tirer des conclusions légitimes à partir de ces informations<sup>4</sup>. Cette tendance est souvent associée à l'IA symbolique ou GOFAI (*Good old-fashioned artificial intelligence*)<sup>5</sup>. Le volet heuristique, quant à lui, repose davantage sur des méthodes statistiques et la reconnaissance de schémas (*pattern recognition*). Il s'agit de l'apprentissage automatique (*machine learning*), qui permet aux systèmes d'IA tels que les SVM (*Support vector machine*) ou les forêts aléatoires (*random forests*) d'apprendre et d'améliorer leurs performances à partir de données, sans être explicitement programmés pour des tâches spécifiques (ill. ci-contre, en bas).

L'IA n'est donc pas figée, mais elle est bien un domaine de recherche en constante évolution qui combine à la fois des approches épistémologiques, visant à représenter et à raisonner sur des connaissances, et des approches heuristiques, permettant aux systèmes d'apprendre et de s'adapter à partir de données. Les progrès réalisés dans des domaines tels que la vision par ordinateur et le traitement du langage naturel ont permis d'étendre les potentialités de l'IA et d'ouvrir de nouvelles perspectives d'application à de nombreux domaines, tels que les humanités numériques et les sciences du patrimoine.

Bien qu'aujourd'hui l'intelligence artificielle soit généralement considérée comme un synonyme de l'apprentissage automatique profond (*deep learning*)

1. Philippe Dillmann *et al.*, « The CNRS/MC Notre-Dame scientific worksite: An extraordinary interdisciplinary adventure », *Journal of Cultural Heritage*, vol. 65, 2024, p. 2-4.

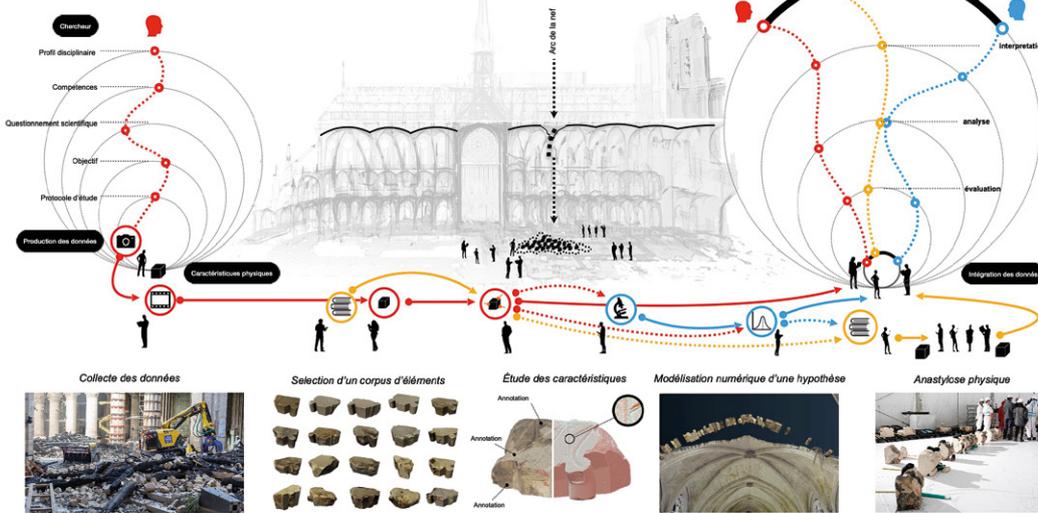
2. Frédéric Alexandre, « Marvin Minsky : l'intelligence artificielle débraillée », *Bulletin de la société informatique de France*, n° 8, mars 2016, p. 1-3.

3. John McCarthy, « Epistemological problems of artificial intelligence », dans Bonnie Lynn Weber et Nils J. Nilsson (eds), *Readings in artificial intelligence*, Morgan Kaufmann, 1981, p. 459-465.

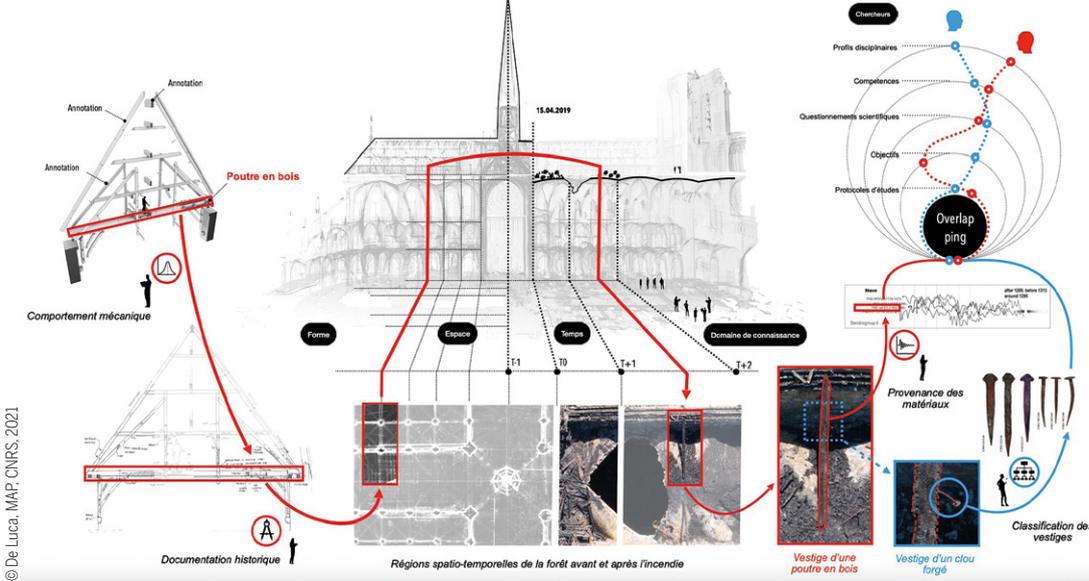
4. Henry Kautz, « The third AI summer: AAAI Robert S. Engelmore memorial lecture », *Ai magazine*, vol. 43, n° 1, 2022, p. 105-125.

5. John Haugeland, *Artificial Intelligence: The Very Idea*, MIT Press, 1989.

### Formaliser et mémoriser les chemins allant des questions scientifiques aux données et aux connaissances

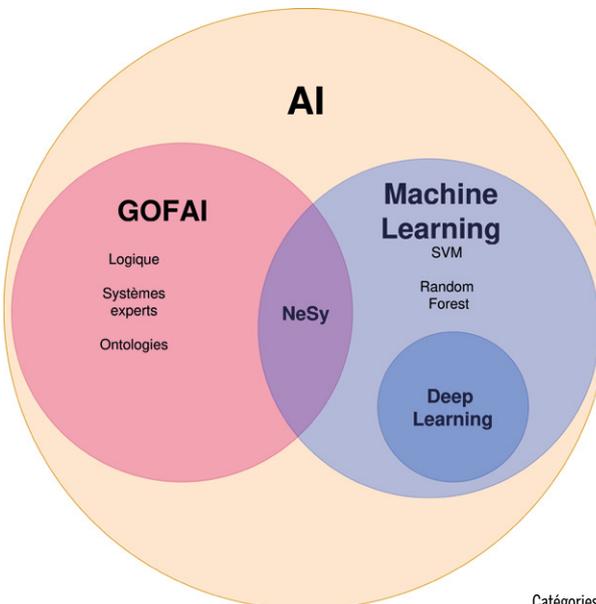


### Analyser les liens entre objets matériels et objets de connaissance



Le groupe de travail « données numériques » a l'objectif de lier les données provenant des objets physiques du patrimoine avec la connaissance collective du chantier scientifique et de restauration.

et des réseaux de neurones artificiels, elle ne se limite pas à ces concepts. La majorité des modèles d'IA se basent sur des données créées, collectées et annotées par des êtres humains. Par conséquent, ils reflètent intrinsèquement la nature des données sur lesquelles ils ont été entraînés. L'intelligence artificielle s'appuie sur des algorithmes et un apprentissage statistique. Nous prenons le parti de définir les modèles d'IA comme le résultat cumulatif de l'intelligence collective de l'ensemble des humains qui génèrent les données initiales, qui les ont nettoyées, traitées et analysées, et de ceux qui conçoivent les algorithmes qui les exploitent. Dans le cadre du chantier scientifique de Notre-Dame de Paris, nous explorons l'association entre les méthodes de *deep learning* pour la reconnaissance de motifs complexes et les capacités d'abstraction et de raisonnement de l'IA symbolique. Nous présentons ici deux expériences d'utilisation de l'IA avec les données de Notre-Dame de Paris dans le groupe de travail « données numériques ».



Catégories d'intelligence artificielle.

6. Kévin Réby, Anaïs Guillem et Livio De Luca, « Semantic segmentation using foundation models for cultural heritage: An experimental study on Notre-Dame de Paris », *Proceedings of the IEEE/CVF ICCV*, 2023, p. 1689-1697.
7. Rishi Bommasani *et al.*, « On the opportunities and risks of foundation models », *arXiv*, 2021.
8. Farhad Pourpanah *et al.*, « A review of generalized zero-shot learning methods », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 45, n° 4, 2023, p. 4051-4070.
9. Jingyi Zhang *et al.*, « Vision-language models for vision tasks: A survey », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 46, n° 8, 2024, p. 5625-5644.
10. Mathilde Caron *et al.*, « Emerging properties in self-supervised vision transformers », *Proceedings of the IEEE/CVF ICCV*, 2021, p. 9650-9660.
11. Alexander Kirillov *et al.*, « Segment anything », *Proceedings of the IEEE/CVF ICCV*, 2023, p. 4015-4026.
12. Alec Radford *et al.*, « Learning transferable visual models from natural language supervision », *arXiv*, 2021.
13. Livio De Luca *et al.*, *L'écosystème numérique n-dame pour l'analyse et la mémorisation multi-dimensionnelle du chantier scientifique Notre-Dame de Paris*, SCAN 22, 2022; Livio De Luca, « A digital ecosystem for the multidisciplinary study of Notre-Dame de Paris », *Journal of Cultural Heritage*, vol. 65, 2024, p. 206-209.
14. <https://frollo.notre-dame.science/opentheso/> (site consulté le 15 juillet 2024).

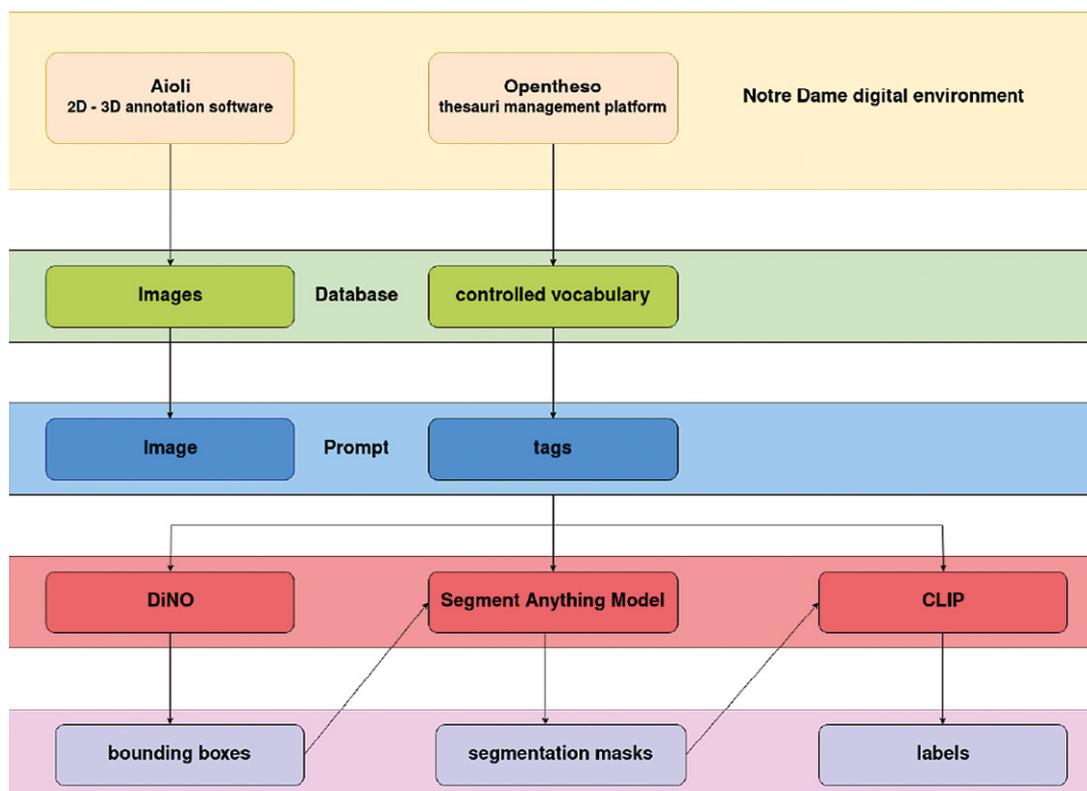
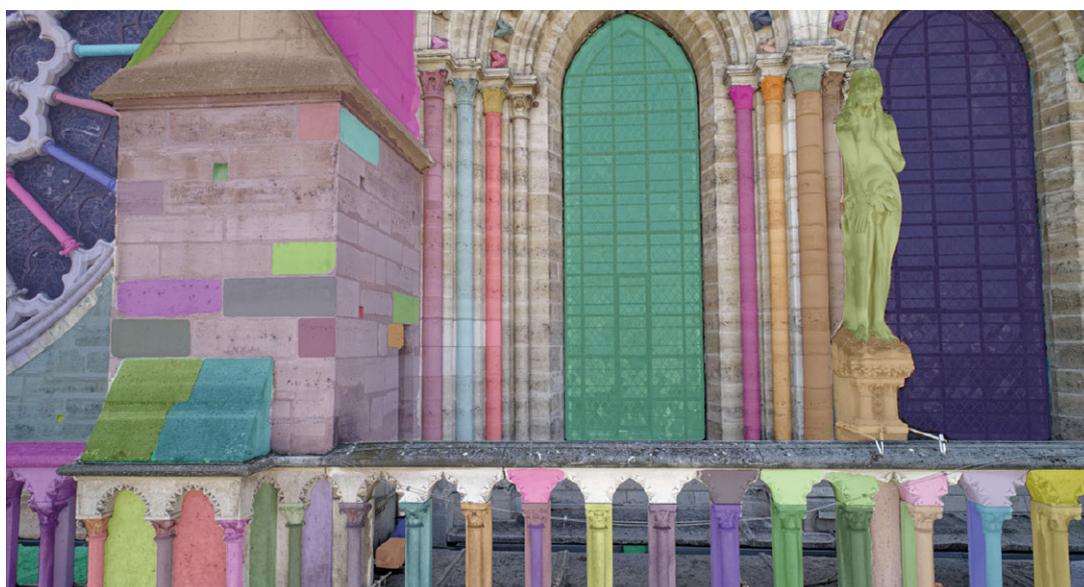
### La segmentation d'images

Notre première expérience<sup>6</sup> implémente un flux de travail multimodal utilisant des modèles de *deep learning* pour la segmentation sémantique d'images, en s'appuyant sur des modèles de fondation<sup>7</sup>. L'objectif est d'attribuer à chaque pixel une classe sémantique prédéfinie, permettant ainsi de reconnaître et d'étiqueter les éléments architecturaux dans les images. Les modèles de fondation, entraînés sur des données massives et variées, apprennent des représentations abstraites leur permettant de s'adapter à de nouvelles tâches<sup>8</sup>. Parmi eux, les modèles de langage visuel (*Vision language model*, VLM) traitent et génèrent à la fois du texte et des images<sup>9</sup>.

Notre approche combine trois modèles de fondation : DiNO<sup>10</sup> pour détecter les objets d'intérêt, SAM<sup>11</sup> pour les segmenter, et CLIP<sup>12</sup> pour associer les masques de segmentation aux étiquettes de notre vocabulaire contrôlé (ill. ci-dessous).

### Les thésaurus et concepts : de la documentation manuelle à l'utilisation des LLM

La seconde expérience concerne le traitement documentaire des vocabulaires contrôlés eux-mêmes. Dans l'écosystème numérique n-dame<sup>13</sup>, l'outil Opentheso<sup>14</sup> permet de documenter et de gérer les concepts et vocabulaires utilisés sous la forme



Chaîne de traitement multimodal pour la segmentation sémantique d'images de Notre-Dame de Paris.

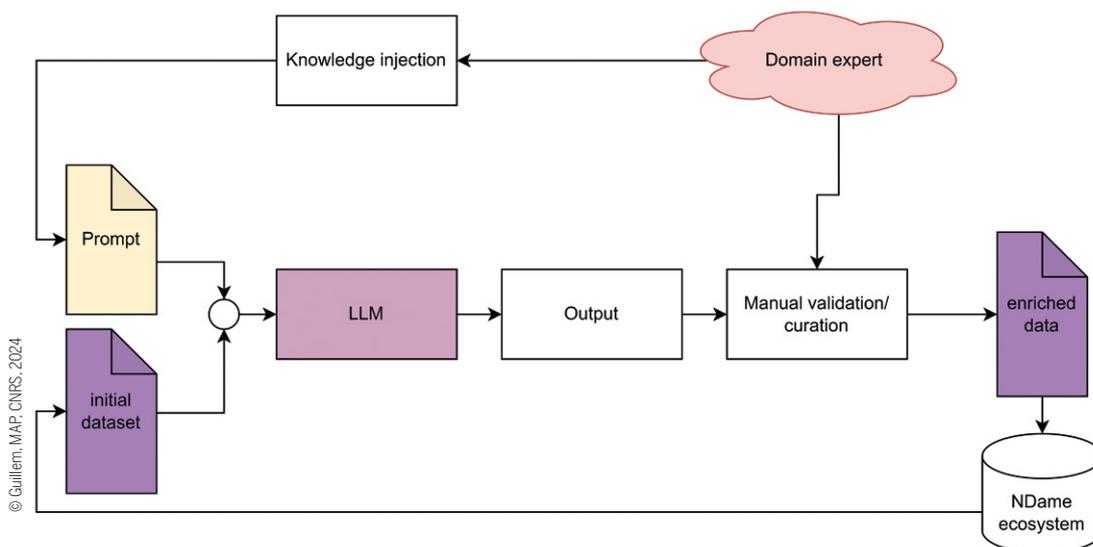


Diagramme représentant le flux de travail pour la documentation de concept de thésaurus en utilisant un LLM.

de thésaurus<sup>15</sup>. La documentation et la gestion des vocabulaires contrôlés sont prises en charge par le groupe de travail « numérique » avec la contribution des experts et membres des autres groupes. Ce travail se fait généralement manuellement pour se mettre d'accord sur les concepts et leurs définitions.

L'expérience (ill. ci-dessus) vise à introduire l'IA dans ce travail de documentation avec les larges modèles de langage (*Large language model*, LLM). Un LLM (comme ChatGPT, Llama, Bert ou Mistral) est un modèle de traitement du langage naturel (*Natural language processing*, NLP) qui utilise des techniques d'apprentissage profond pour comprendre et générer du texte en langage humain. Les LLM sont entraînés sur de vastes ensembles de données textuelles pour prédire des mots masqués ou en générer de nouveaux à partir du contexte, généralement un texte<sup>16</sup>. Les LLM sont utilisés dans diverses applications comme la génération de texte, la traduction automatique, les *chatbots*, la rédaction assistée, etc. Dans notre cas, il s'agit d'utiliser le LLM pour aider à la documentation des concepts de thésaurus. Des *prompts*<sup>17</sup> sont rédigés pour donner des instructions au LLM afin d'enrichir les données de thésaurus. Les thésaurus sont représentés dans un système d'IA que l'on appelle un graphe de connaissance (*Knowledge graph*, KG) et structurés grâce au modèle SKOS (*Simple knowledge organization system*)<sup>18</sup>, qui est un modèle ontologique pour représenter les concepts et leurs définitions ou leurs usages, ainsi que les relations parent/enfant entre concepts. Le volet épistémologique et heuristique de l'IA se rencontre dans cette expérience où l'injection des éléments de sémantique du SKOS permet de structurer le graphe de connaissances et de limiter la génération d'hallucinations par le LLM. Cette combinaison entre l'IA symbolique et les réseaux de neurones profonds est appelée NeuroSymbolique (NeSy)<sup>19</sup>. L'intelligence artificielle et l'intelligence humaine se complètent : le LLM permet de traiter des données massives rapidement, mais les acteurs humains sont nécessaires pour initier ces processus de documentation et vérifier la qualité des résultats générés.

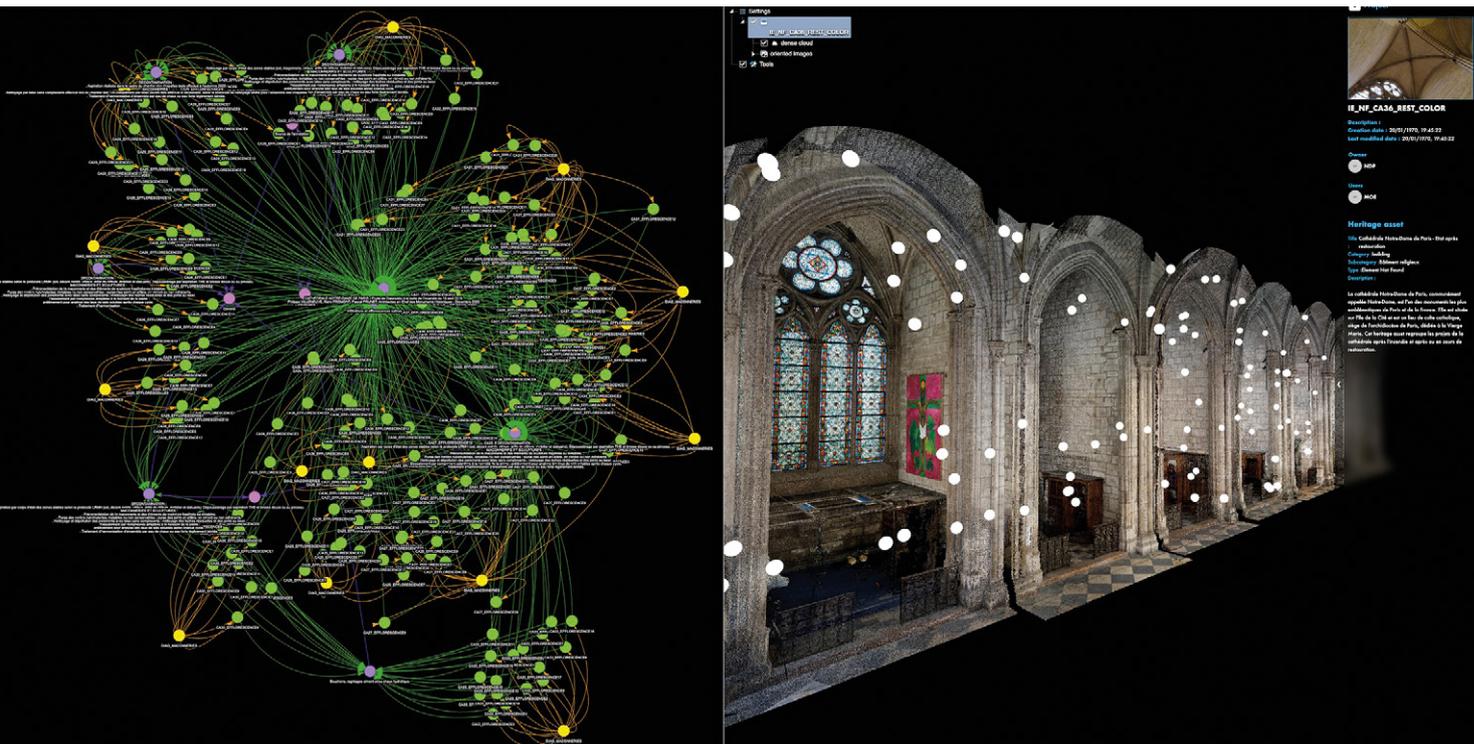
### L'IA comme outil au service de l'expertise humaine

Ces démarches exploratoires démontrent que nous nous approchons progressivement de la construction d'espaces d'information situés à la croisée de la visualisation des objets matériels et des graphes de connaissance. La création de ce corpus de données peut aujourd'hui être explorée pour étudier la relation intime que nous tissons entre objets matériels et objets de connaissance, particulièrement dans un contexte pluridisciplinaire. L'illustration page suivante, en haut, représente un prototype d'environnement numérique pour l'exploration d'un corpus d'annotations, combinant un graphe de relations sémantiques et une scène 3D. Ce prototype permet de parcourir des observations scientifiques à travers deux dimensions : celle de la dimension physique de la cathédrale et celle où les caractéristiques de l'objet physique sont isolées, comparées et mises en relation avec des concepts, des attributs et des qualités.

Pour expliciter l'enjeu scientifique des travaux futurs, une portion d'espace permet de dévoiler les multiples couches de descriptions et d'interprétations<sup>20</sup> (ill. page suivante, en bas). Ces couches se manifestent par des concepts, des attributs de description, des termes de vocabulaire et des protocoles d'étude : un seul segment de l'espace peut être le point de départ de multiples analyses et interprétations, illustrant la richesse et la complexité des approches pluridisciplinaires<sup>21</sup>.

L'intelligence artificielle se révèle donc être un outil puissant pour combiner l'intelligence collective des experts avec les capacités de traitement de données massives et de reconnaissance de schémas complexes des algorithmes de *deep learning*. Cette synergie ouvre de nouvelles perspectives. En effet, l'IA excelle dans le traitement de grands ensembles de données, où les relations entre les éléments sont souvent opaques et difficiles à cerner. L'IA ne remplace donc pas l'expertise humaine, bien au contraire, elle

15. Miled Rousset et Blandine Nouvel, *Opentheso, gestionnaire de thésaurus normalisé et multilingue pour un web de données ouvertes*, FRANTIQ, 2014.
16. Tyler A. Chang et Benjamin K. Bergen, « Language model behavior: A comprehensive survey », *Computational Linguistics*, vol. 50, n° 1, 2024, p. 293-350.
17. Un *prompt* est une instruction ou une série de données fournies à un système d'IA, qui utilise ces informations pour générer des réponses ou des créations en texte, image ou autre forme de média.
18. Alistair Miles et José R. Pérez-Aguera, « SKOS: Simple knowledge organisation for the web », *Cataloging & Classification Quarterly*, vol. 43, n° 3-4, 2007, p. 69-83.
19. Pascal Hitzler et Md Kamruzzaman Sarker (eds), *Neuro-Symbolic Artificial Intelligence: The State of the Art*, IOS Press, coll. « Frontiers in Artificial Intelligence and Applications », 2022.
20. Anais Guillem *et al.*, « Versioning virtual reconstruction hypotheses: Revealing counterfactual trajectories of the fallen vousoirs of Notre-Dame de Paris using reasoning and 2D/3D visualization », *Satellite Proceedings ESWC 2024*, 2024.
21. Anais Guillem *et al.*, « RCC8 for CIDOC CRM: Semantic modeling of mereological and topological spatial relations in Notre-Dame de Paris », *SWODCH 2023*, 2023.

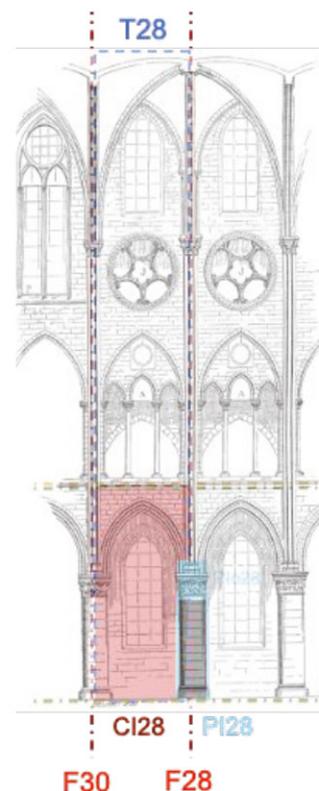
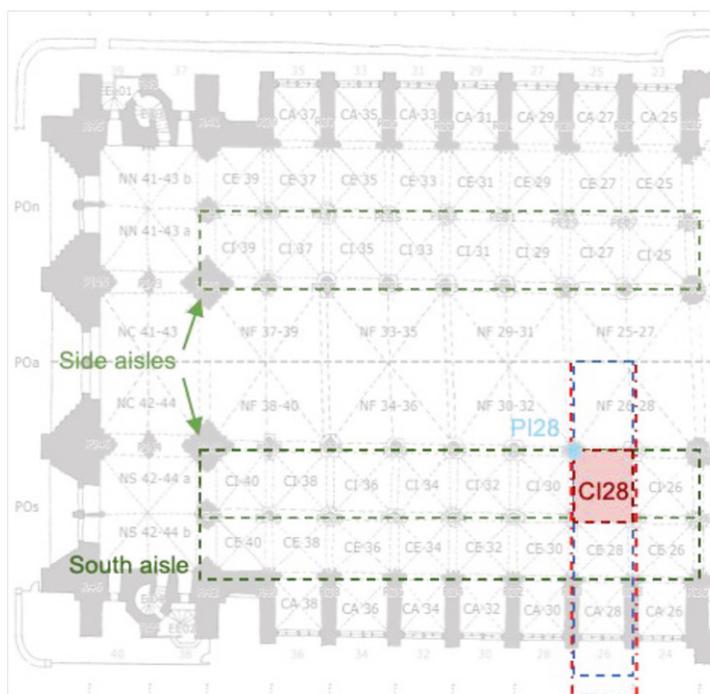


© De Luca, MAP, CNRS, 2024

Prototype d'environnement numérique permettant l'exploration d'un corpus d'annotations spatialisées en utilisant des liens bilatéraux entre un graphe de relations sémantiques et une scène 3D.

la complète et la renforce. Les systèmes d'IA peuvent analyser des volumes colossaux de données, identifier des patterns et aider à la visualisation des hypothèses que les experts peuvent ensuite explorer et affiner.

Cette collaboration entre intelligence humaine, collective et artificielle permet de dépasser les limites de la connaissance individuelle et d'aboutir à des conclusions plus complètes et précises. ■



© Guillem, MAP, CNRS, 2023

Nomenclature des espaces de la cathédrale établie par la maîtrise d'œuvre, dont les données ont été enrichies dans l'écosystème numérique avec les relations de partie au tout (méréologie) et de voisinage (topologie).

**Bibliographie**

- <http://www.ndameheritage.map.cnrs.fr/> (site consulté le 15 juillet 2024).
- <https://www.notre-dame.science/> (site consulté le 15 juillet 2024).

# L'IA et les nouvelles technologies à la rescousse de la lutte contre le trafic de biens culturels

Tous ceux qui sont engagés dans la lutte contre le trafic de biens culturels ont perçu depuis longtemps les bénéfices qui pouvaient être tirés des nouvelles technologies et des avancées de la recherche en ce domaine.

À cet égard, comme l'indique le Conseil de l'Europe, « associée à d'autres technologies, l'IA est également en voie de devenir notre principale ressource technologique pour relever certains des plus grands défis auxquels nous faisons face dans le cadre de la protection de notre passé, tels que le changement climatique et le pillage, la dégradation ou le trafic illicite de biens culturels<sup>1</sup> ».

Le constat de l'émergence de nouvelles formes de trafics et de leur complexification, liée à l'usage des moyens numériques par des réseaux criminels, fait apparaître une nécessité d'adaptation à ces évolutions. C'est le volet de l'amélioration de la détection et du repérage des biens culturels en situation illicite, et donc de l'efficacité de la réponse des services répressifs, qui constitue actuellement l'axe principal de développement de l'application de nouvelles technologies, en particulier en recourant aux potentialités de l'Intelligence artificielle (IA), dont Arte-Fact, développé par une société française, est une illustration emblématique et prometteuse.

## Des avancées technologiques progressives utilisées dans le traitement des objets volés

Au gré des évolutions technologiques, pour répondre aux nécessités de signalement des biens culturels volés, on est passé de circulaires de recherche diffusées sur papier à des CD-ROM avant des outils informatiques plus élaborés, recourant notamment désormais aux possibilités nouvelles de l'IA. L'essor d'Internet a évidemment aussi contribué à ouvrir des pistes, non seulement pour les services de lutte contre le trafic mais malheureusement aussi pour les trafiquants en leur facilitant les moyens d'écoulement de biens d'origine illicite.

Quoi qu'il en soit, les progrès technologiques ont au fur et à mesure permis la création et le développement de bases de données d'objets volés ou disparus. Ainsi, INTERPOL a établi depuis 1995 la seule base de données internationale contenant des informations de police certifiées sur des objets d'art volés et manquants<sup>2</sup>. Ouverte en ligne sur inscription depuis 2009, elle a été modernisée par l'intermédiaire du projet PSYCHE (*Protection System for Cultural Heritage*), initié en 2012, financé par l'Union européenne et piloté par l'Italie, principalement pour automatiser davantage l'alimentation à partir des bases nationales existantes et intégrer un système de comparaison d'images plus performant.

Sur le plan national, la base TREIMA (Thésaurus de recherche électronique et d'imagerie en matière artistique) de l'Office central de lutte contre le trafic de biens culturels (OCBC), créée en 1995, contient actuellement plus de 100 000 photographies de biens volés et a été dotée dès 2005 d'une fonctionnalité de reconnaissance d'images. Cette photothèque a son pendant transalpin avec la base LEONARDO du Comando Carabinieri per la Tutela del Patrimonio Culturale (TPC), la police italienne spécialisée dans les biens culturels<sup>3</sup>, et nord-américain avec la base *National stolen art file* (NSAF) du FBI, créée en 1979 et accessible en ligne depuis 2011<sup>4</sup>.

## CLAIRE CHASTANIER

Adjointe au sous-directeur des collections, Service des musées de France, Direction générale des patrimoines et de l'architecture (DGPA), ministère de la Culture

## AXEL KEREP

Archéologue et chef de projet, PARCS Solutions

1. Arianna Traviglia, « Les technologies numériques (y compris l'intelligence artificielle) au service du patrimoine culturel dans le cadre des conventions du Conseil de l'Europe relatives au patrimoine », dans *Créer notre avenir : la créativité et le patrimoine culturel en tant que ressources stratégiques pour une Europe diversifiée et démocratique*, conférence des ministres de la Culture du Conseil de l'Europe, Strasbourg, 1<sup>er</sup> avril 2022, p. 3.

2. <https://www.interpol.int/fr/Infractions/Atteintes-au-patrimoine-culturel/Base-de-donnees-sur-les-oeuvres-d-art-volees> (site consulté le 13 juillet 2024).

3. <https://tpcweb.carabinieri.it/SitoPubblico/home> (site consulté le 13 juillet 2024).

4. <https://artcrimes.fbi.gov> (site consulté le 7 octobre 2024).



Agente de l'OCBC interrogeant la base TREIMA.

5. <https://www.interpol.int/fr/Infractions/Atteintes-au-patrimoine-culturel/Application-mobile-ID-Art>
6. Marion Le Bec, « Une application mobile italienne pour lutter contre le trafic de biens culturels », *Le Journal des Arts*, 4 avril 2014.
7. Louise Wagon, « Le FBI lance une application pour identifier les œuvres volées », *Le Journal des Arts*, 18 avril 2023.
8. <https://www.lutec.com/blog/protection-du-patrimoine-culturel/> (site consulté le 13 juillet 2024).
9. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022DC0800>.
10. <http://www.prevision-h2020.eu/>; <https://www.ensp.interieur.gouv.fr/Recherche/Les-axes-prioritaires-de-recherche/Systemique-entre-sciences-humaines-et-sociales-et-sciences-de-l-information-et-des-technologies/PREVISION-Prediction-and-Visual-Intelligence-for-Security-Information2> (sites consultés le 9 juillet 2024).
11. <https://www.anchise.eu/> (site consulté le 9 juillet 2024). Voir dans ce numéro l'article de Titien Bartette, Véronique Chankowski et Irène Ziatsev, « L'innovation au service de la lutte contre le pillage et le trafic des biens culturels : le cas du projet européen ANCHISE et la place d'ICONEM », p. 17.
12. <https://cordis.europa.eu/project/id/101073932/fr>; <https://rithms.eu/> (sites consultés le 14 juillet 2024).
13. <https://cordis.europa.eu/project/id/101094237/fr>; <https://eu-enigma.eu/> (sites consultés le 13 juillet 2024).
14. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B2-2022-729/2022/isprs-archives-XLIII-B2-2022-729-2022.pdf>; <https://apac labs.cyi.ac.cy/news/SIGNIFICANCE-Funding/> (sites consultés le 7 octobre 2024).
15. <https://tpcweb.carabinieri.it/SitoPubblico/home/informazioni/swoads>
16. <https://www.artnewspaper.fr/2021/01/20/lallemagne-developpe-application-pour-identifier-le-patrimoine-culturel-pille> (site consulté le 14 juillet 2024).
17. [https://www.kulturstiftung.de/wp-content/uploads/2020/09/Illicit\\_report\\_english.pdf](https://www.kulturstiftung.de/wp-content/uploads/2020/09/Illicit_report_english.pdf) (site consulté le 13 juillet 2024).

À l'exception de TREIMA, ces bases sont désormais déclinées sous la forme d'applications pour smartphones, largement accessibles, même au grand public : ID-Art lancée en 2021 par INTERPOL<sup>5</sup>, iTPC des carabinieri depuis 2014<sup>6</sup> et NSAF depuis 2023 pour le FBI<sup>7</sup>. Si ces applications améliorent les possibilités de vérification en mobilité, elles restent dotées, comme leurs versions antérieures, de fonctionnalités de reconnaissance d'images par similarité visuelle fondées sur l'analyse par différents algorithmes des photographies et de traitement mathématique des caractéristiques spécifiques de l'image (comparaison des couleurs et des distances des pixels entre eux qui forment une signature mathématique unique, permettant des rapprochements, dits « *match* » ou « *hit* »)<sup>8</sup> sans besoin de recours au type d'Intelligence artificielle (IA) appelé apprentissage automatique (*machine learning*) ou même profond (*deep learning*), sa sous-catégorie.



Illustration du trafic d'antiquités. Buste cyrénéique pillé, retrouvé en France et restitué à la Libye le 12 octobre 2023.

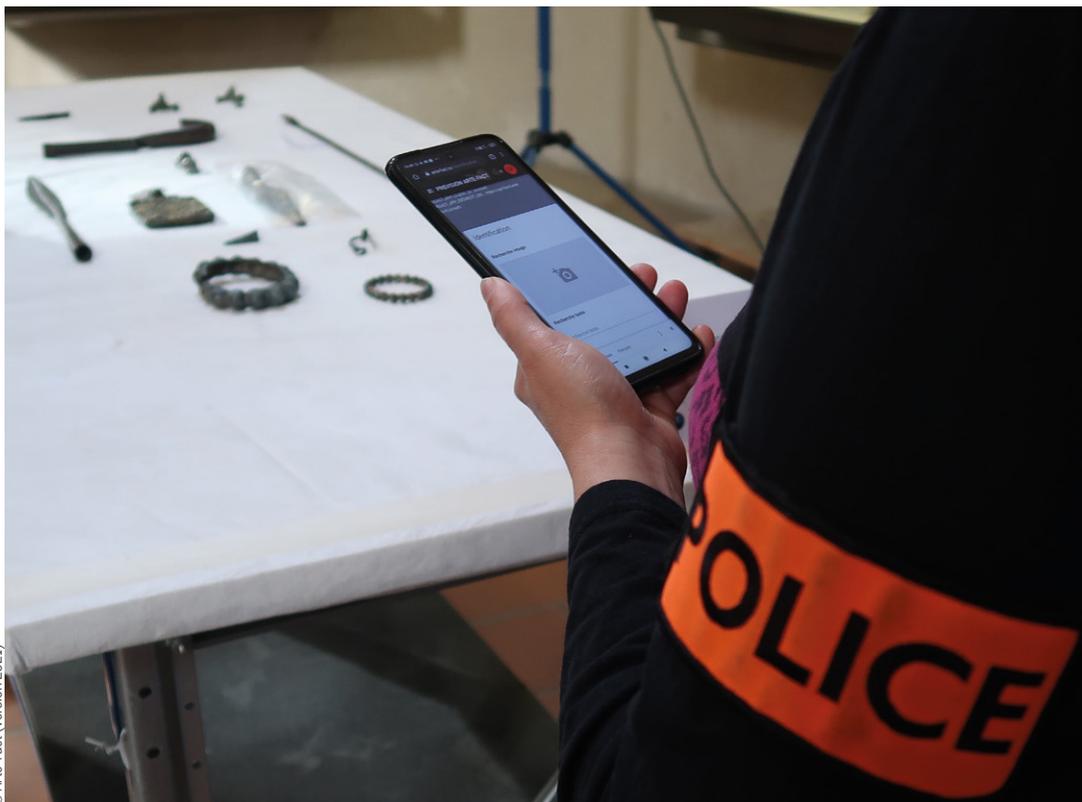
## Vers des outils adossés à l'IA en réponse à de nouveaux défis

Même si des difficultés d'application doivent encore être surmontées, l'IA commence à être convoquée pour apporter des réponses à d'autres enjeux de la lutte contre le trafic : la détection rapide pour améliorer l'issue des contrôles, notamment concernant des objets non répertoriés dans des bases et des repérages parmi des millions de pages Internet existantes (balayages web ou *crawling*) avec un objectif d'automatisation d'opérations de veille chronophages et impossibles à mener à de telles échelles par une simple surveillance humaine.

C'est pourquoi l'IA figure dans les préconisations convergentes de différentes enceintes internationales pour encourager son utilisation à des fins de protection patrimoniale, comme dans la déclaration finale du 20 septembre 2024 de la réunion des ministres de la « culture » du G7 sous présidence italienne, qui s'est tenue à Naples [<https://www.g7italy.it/wp-content/uploads/G7-Culture-Declaration-EN-DEF.pdf> (site consulté le 19 octobre 2024)], ou dans le Plan d'action de l'Union européenne pour lutter contre le trafic de biens culturels, publié le 13 décembre 2022<sup>9</sup>.

Dans ce prolongement, on constate un foisonnement de projets ambitieux autour de l'IA, soutenus principalement par l'Union européenne, pour aider les forces de sécurité à affronter, notamment sur le plan numérique, à armes plus égales les trafiquants de biens culturels. Ainsi, dans le cadre des programmes européens de financement de la recherche et de l'innovation, Horizon 2020 (2014-2020) a permis le lancement de PREVISION (*Prediction and visual intelligence for security information*), auquel participait le laboratoire de recherche de l'École nationale supérieure de la police (ENSP)<sup>10</sup>. Grâce au programme suivant Horizon Europe (2021-2027), sont en cours les projets ANCHISE (*Applying new solutions for cultural heritage protection by innovative, scientific, social and economic engagement*)<sup>11</sup>, RITHMS (*Research, intelligence and technology for heritage and market security*)<sup>12</sup> et ENIGMA (*Endorsing safeguarding, protection, and provenance management of cultural heritage*)<sup>13</sup>. Quant au Fonds européen pour la sécurité intérieure-police (*Internal security fund-ISF*), il a bénéficié au projet SIGNIFICANCE (*Stop illicit heritage trafficking with artificial intelligence*)<sup>14</sup>.

De manière connexe et en s'appuyant également sur l'IA, l'Italie, avec le support financier de l'ISF, a développé le système SWOADS (*Stolen works of art detection system*)<sup>15</sup>, logiciel de recherche de biens volés sur Internet, y compris le *deep* et le *dark web* ainsi que les réseaux sociaux, qui a remporté l'International Innovative Force Police Award lors du Sommet mondial de la police (WPS) à Dubaï en 2023, en tant que meilleure innovation informatique policière, tandis que le gouvernement fédéral allemand soutient l'application KIKU<sup>16</sup>, qui fait suite au rapport ILLICID de 2019<sup>17</sup> et sera prochainement mise en production pour équiper les smartphones des policiers bavarois.



© Arte-Fact (version 2021)

Démonstration de l'application mobile pour les forces de sécurité au Musée d'archéologie nationale de Saint-Germain-en-Laye (MAN), avec l'aimable autorisation du MAN.

Dans un même objectif de facilitation du travail des forces de l'ordre, ces outils utilisent pour la reconnaissance d'images, qui constitue le facteur déterminant des progrès dans la lutte contre le trafic de biens culturels, la comparaison par signature avec des bases de données d'objets référents, mais aussi avec la perspective d'exploiter à terme la technologie de l'apprentissage profond : avec les réseaux de neurones artificiels, chaque objet a des critères constitutifs précis qui servent à établir un « modèle » correspondant à la typologie de l'objet défini, sur lequel l'IA pourra s'entraîner. Pour chaque modèle, la machine doit apprendre à partir d'un nombre d'images très important, que les spécialistes en IA estiment à un minimum d'un millier par modèle. Or l'archéologie, par exemple, à l'opposé d'autres secteurs, possède des corpus typologiques très inégaux, dépourvus pour certains de grandes séries, empêchant d'atteindre le seuil d'images requises pour définir un modèle complet. L'approche par l'apprentissage automatique se trouve donc conditionnée à la question cruciale de l'accès aux données et à leur agrégation nécessaire pour atteindre des résultats satisfaisants avec cette forme d'IA. Aussi, la reconnaissance d'image par ce moyen ne fonctionne à ce stade que sur des ensembles restreints pour des programmes de recherche et peut difficilement être appliquée pour un usage opérationnel du quotidien. Les rapprochements par signature d'image restent encore à ce jour la technologie la plus efficace et, pour ce faire, le service des musées de France a mis à disposition des jeux de données issues notamment de la base Joconde<sup>18</sup> afin de contribuer aux tests initiaux d'Arte-Fact.

### L'exemple d'Arte-Fact

Arte-Fact<sup>©19</sup>, application française d'identification d'objets culturels et de connexion dynamique aux experts du patrimoine développée par la société PARCS<sup>20</sup>, créée dans un cadre pluridisciplinaire, a intégré successivement différents projets et consortiums européens : PREVISION pour la conception et le développement de l'outil, NETCHER (*Social platform for cultural heritage*)<sup>21</sup> pour affiner ses fonctionnalités selon les besoins exprimés par les polices et douanes partenaires, et actuellement ANCHISE afin de poursuivre le travail technique sur l'application débuté avec PREVISION.

Aujourd'hui, l'outil est utilisé par l'OCBC depuis 2023 et fait l'objet d'un partenariat de recherche, ainsi que d'autres applications comme SWOADS et KIKU, avec le Core Group EUROPOL dédié au trafic illicite<sup>22</sup>. Au sein du consortium ANCHISE, Arte-Fact est développé en collaboration avec l'ICOM, l'ENSP, l'Université de Poitiers au travers de son laboratoire CelTrac<sup>23</sup> et le laboratoire technologique allemand Fraunhofer SIT<sup>24</sup>.

En France, les actions contre les trafiquants d'objets d'art résultent du travail de l'OCBC et des différentes composantes de la douane (Direction générale, brigades de surveillance, Direction nationale du renseignement et des enquêtes douanières-DNRED, etc.). Du fait de leur rôle de police dans les flux de marchandises (importation, exportation et circulation), les douanes sont en première ligne face aux trafics de masse de biens culturels. Mettre la pression sur les réseaux de transit et de distribution est une priorité avant que les objets pillés n'atteignent un point de vente sur le marché légal. Aussi, la diffusion large d'outils

18. <https://www.culture.gouv.fr/Thematiques/Musees/Les-musees-en-France/Les-collections-des-musees-de-France/Joconde-catalogue-collectif-des-collections-des-musees-de-France> (site consulté le 15 juillet 2024).

19. <https://www.culture.gouv.fr/Nous-connaître/Organisation-du-ministère/Commission-de-recolement-des-depots-d-œuvres-d-art/Toutes-les-actualités-de-la-CRDOA/Arte-Fact-la-future-application-de-lutte-contre-le-traffic-des-biens-culturels> (site consulté le 15 juillet 2024).

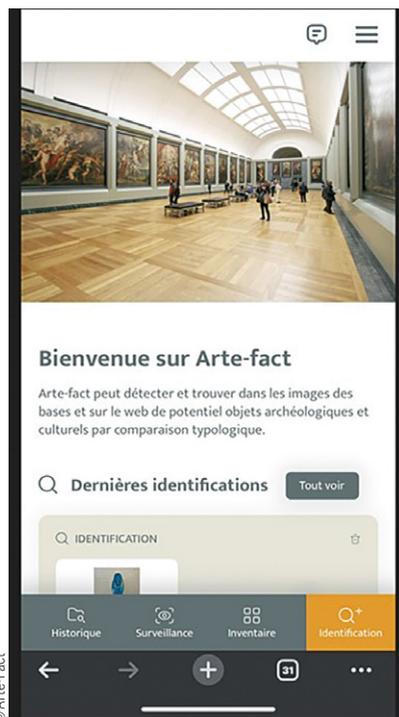
20. <https://www.parc.solutions/fr/> (site consulté le 9 juillet 2024).

21. Voir l'article : Sabine Fourrier, Véronique Chankowski et Marine Léchenault, « Le projet européen Netcher », *Culture et Recherche*, n° 143, automne-hiver 2022, p. 16-17 ; et dans ce numéro : Titien Bartette, Véronique Chankowski et Irène Zaitsev, « L'innovation au service de la lutte contre le pillage et le trafic des biens culturels : le cas du projet européen ANCHISE et la place d'ICONEM », p. 17.

22. <https://www.europol.europa.eu/operations-services-and-innovation/innovation-lab> (site consulté le 9 juillet 2024).

23. Cellule de recherches sur le trafic de biens culturels : <https://herma.labo.univ-poitiers.fr/programmes-sur-contrat/laboratoire-des-trafics-celtrac/> (site consulté le 13 juillet 2024).

24. <https://www.sit.fraunhofer.de/en/> (site consulté le 9 juillet 2024).



Écran de la version mobile 2023.



Connexion aux experts via l'application mobile.

notamment rattachés aux musées nationaux. Grâce à Arte-Fact®, ces experts pourraient être connectés rapidement aux utilisateurs et parachever des identifications plus immédiates à l'occasion de contrôles.

L'apport de l'IA est ainsi avant tout une aide à la prise de décision. En renforçant la coopération experts-agents, cette technologie n'oublie pas la validation humaine et les liens opérationnels entre métiers. L'IA s'améliore d'année en année mais ne remplace pas les professionnels. En revanche, son atout majeur consiste à diminuer grandement, voire à éliminer, les tâches répétitives et chronophages, pour que l'enquêteur se consacre pleinement à l'analyse et à l'investigation.

En dehors de sa participation à ANCHISE, Arte-Fact déploie d'autres modules, dont un de surveillance et de traque des objets illicites sur Internet, Arte-Fact Watcher®, qui est en cours de développement avec la douane française en réponse à un appel à projet national.

Par l'évidence de ses potentialités, même s'il reste encore des difficultés pour parvenir à les exploiter pleinement, l'IA, sous ses différentes formes, s'impose de plus en plus, en tant que source d'opportunités et de réponses aux défis actuels, comme un auxiliaire pertinent pour participer à la lutte contre le trafic illicite de biens culturels. Dans cette perspective, de nombreux travaux conduits depuis ces dernières années visent à donner des moyens technologiques supérieurs aux services d'application de la loi pour renforcer leur efficacité opérationnelle.

Au-delà du perfectionnement poursuivi de la reconnaissance d'images et de la capacité décuplée qu'il offrira dans la recherche des objets, en particulier sur Internet, d'autres pistes prometteuses de recours à l'IA pourraient venir concourir à l'amélioration de la connaissance de la traçabilité des œuvres, telle que l'exploration approfondie des ressources des catalogues de ventes publiques qu'expérimente le projet DataCatalogue<sup>30</sup>, ainsi que de nouvelles applications dont on peine encore à imaginer toutes les implications futures. ■

IA de soutien à l'action de terrain tels qu'Arte-Fact devrait logiquement accroître le nombre de saisies, non seulement dans le cadre d'actions internationales concertées telles que Pandora VII<sup>25</sup>, mais aussi au cours de contrôles de routine dans les zones portuaires, frontalières et les hubs aéroportuaires (l'Organisation mondiale des douanes chiffrait en 2019 à 47,5 % ces cas de détection de trafics illicites<sup>26</sup>).

Fruits du développement des outils de reconnaissance d'images par l'analyse de signature mathématique, les fonctions IA d'Arte-Fact poursuivies au sein d'ANCHISE sont les suivantes :

- identification des objets culturels volés ou potentiellement pillés (donc inconnus/non documentés, ce qui est souvent le cas des biens archéologiques issus de fouilles clandestines) ;
- rapprochement des objets inconnus avec des listes d'alertes ;
- connexion aux experts *via* le module Arte-Fact Expert Connect®.

Arte-Fact permet donc aux agents sur le terrain d'identifier en quelques secondes un objet possiblement en situation illicite et de confirmer éventuellement sa présence sur des listes d'alertes internationales et les « listes grises<sup>27</sup> ».

De plus, pour chaque rapprochement avec une typologie connue, l'application va proposer à l'utilisateur de continuer l'investigation en suggérant le contact d'un expert sur l'objet identifié. La connexion rapide entre policiers/douaniers et experts est une demande forte des autorités en ce qu'elle optimise la rapidité dans la détermination de la conduite à tenir. Si des groupes d'experts existent déjà, comme ARCHEO<sup>28</sup> ou CULTNET<sup>29</sup>, le ministère de la Culture dispose aussi de nombreux conservateurs qualifiés,

25. <https://www.interpol.int/fr/Actualites-et-evenements/Actualites/2023/60-personnes-arretees-et-plus-de-11-000-objets-retrouves-au-cours-d-une-operation-internationale-ciblante-le-traffic-d-oeuvres-d-art> (site consulté le 15 juillet 2024).

26. Organisation mondiale des douanes, *Rapport sur les trafics illicites 2019*, Bruxelles, 2019, p. 19.

27. Arte-Fact Grey List ©. Ensembles d'objets suspects signalés par les archéologues ou associations de lutte contre le trafic, et généralement trouvés sur les réseaux sociaux ou marchés « gris ». Elles permettraient une traçabilité et une confrontation contradictoire avec des objets en vente ressemblants et dont la provenance serait potentiellement falsifiée. Cette dernière fonction est un champ exploratoire proposé dans le cadre du projet ANCHISE.

28. [https://www.wcoomd.org/-/media/wco/public/global/pdf/topics/enforcement-and-compliance/activities-and-programmes/cultural-heritage/archo\\_brochure\\_en.pdf](https://www.wcoomd.org/-/media/wco/public/global/pdf/topics/enforcement-and-compliance/activities-and-programmes/cultural-heritage/archo_brochure_en.pdf) (site consulté le 9 juillet 2024).

29. <https://www.coe.int/fr/web/culture-and-heritage/-/meeting-of-the-cultnet-network-of-experts-in-the-protection-of-historical-heritage> (site consulté le 9 juillet 2024).

30. <https://www.bnf.fr/fr/quelques-projets-dintelligence-artificielle-en-cours-la-bnf> ; <https://inria.hal.science/hal-03618381/> (sites consultés le 15 juillet 2024).

## Bibliographie

Luc Julia, *L'intelligence artificielle n'existe pas*, First, janvier 2019.

Yann Le Cun, *Quand la machine apprend*, Odile Jacob, octobre 2019.

Patrice Le Loarer et Tristan Cadenat, « Unir les expertises pour lutter contre les trafics illicites de biens culturels », dans Vincent Michel (dir.), *Trafic illicite des biens culturels et nouvelles technologies*, Journée d'études, Université de Poitiers, décembre 2020.

Eva Savina Malinverni, Dante Abate, Antonia Agapiou *et al.*, « SIGNIFICANCE deep learning based platform to fight illicit trafficking of Cultural Heritage goods », *Science Reports*, n° 14, juillet 2024, article n° 15081. <https://www.nature.com/articles/s41598-024-65885-6/> (site consulté le 14 juillet 2024).

# L'innovation au service de la lutte contre le pillage et le trafic des biens culturels : le cas du projet européen ANCHISE et la place d'ICONEM

ANCHISE (Appliquer de nouvelles solutions pour la protection du patrimoine culturel à travers une démarche innovante, scientifique, sociale et économique) est un projet européen de lutte contre le pillage et le trafic des biens culturels. Débuté en février 2023 et financé par le programme Horizon Europe pour trois ans, le projet adopte une approche globale et multidisciplinaire afin de développer un ensemble d'outils à travers des méthodes centrées sur l'utilisateur, rapprochant les technologies de la demande (détection du pillage, détection du patrimoine négligé ou abandonné, marquage des objets, identification et traçabilité des artefacts).

## ANCHISE : l'innovation au service de la lutte contre le pillage et le trafic des biens culturels<sup>1</sup> (VC & IZ)

ANCHISE vise à développer des outils pour les différents acteurs de cette lutte, tels que les forces de l'ordre et les institutions culturelles, ainsi qu'une série de recommandations à l'intention des professionnels et des décideurs politiques. ANCHISE est coordonné par l'École française d'Athènes et repose sur la collaboration active de quinze partenaires incluant des universités et établissements publics de recherche (École française d'Athènes, Université Lumière Lyon 2, CNRS, Université de Poitiers, Institut universitaire européen de Florence, Université technique de Chypre), des centres de recherche (Fraunhofer, *International Conference on computational science* [ICCS], Cyprus Institute), des associations européennes (Michael Culture Association), des spécialistes de terrain (École nationale supérieure de la police ENSP, Conseil international des musées ICOM) et des groupes privés (PARCS, ICONEM, INOV).

Fortes d'une approche centrée sur un solide réseau d'utilisateurs hérité pour partie du précédent projet NETCHER (*Social platform for cultural heritage*) Horizon 2020 et de nouveaux participants, d'une

analyse de l'existant en matière d'outils et d'une méthodologie alternant remontées de besoins des acteurs et démonstrations, les trois entreprises PARCS, ICONEM et INOV sont associées aux centres de recherche Fraunhofer SIT, Cyprus Institute et ICCS pour le développement de six solutions technologiques innovantes. La boîte à outils d'ANCHISE, portée par ses partenaires technologiques, est ainsi composée d'un outil d'analyse des vues satellitaires et de la photogrammétrie (Monitoring Toolbox, ICONEM) ; de deux outils d'identification des collections (KIKU, Fraunhofer SIT), dont un est dédié à un usage par les autorités aux frontières (Arte-Fact, PARCS), et de



## TITIEN BARTETTE (TB)

Directeur scientifique, ICONEM

## VÉRONIQUE CHANKOWSKI (VC)

Professeure d'université, directrice de l'École française d'Athènes (EFA)

## IRÈNE ZAITSEV (IZ)

Project Manager du projet ANCHISE au sein de l'EFA

Avec la contribution de Michael Culture Association (Marco Fiore, Pier Giacomo Sola, Corinne Szeinszneider)

1. Voir, dans ce numéro, l'article de Claire Chastanier et Axel Kerep, « L'IA et les nouvelles technologies à la rescousse de la lutte contre le trafic de biens culturels », p. 13.

Logo du projet européen ANCHISE.  
© Michael Culture Association

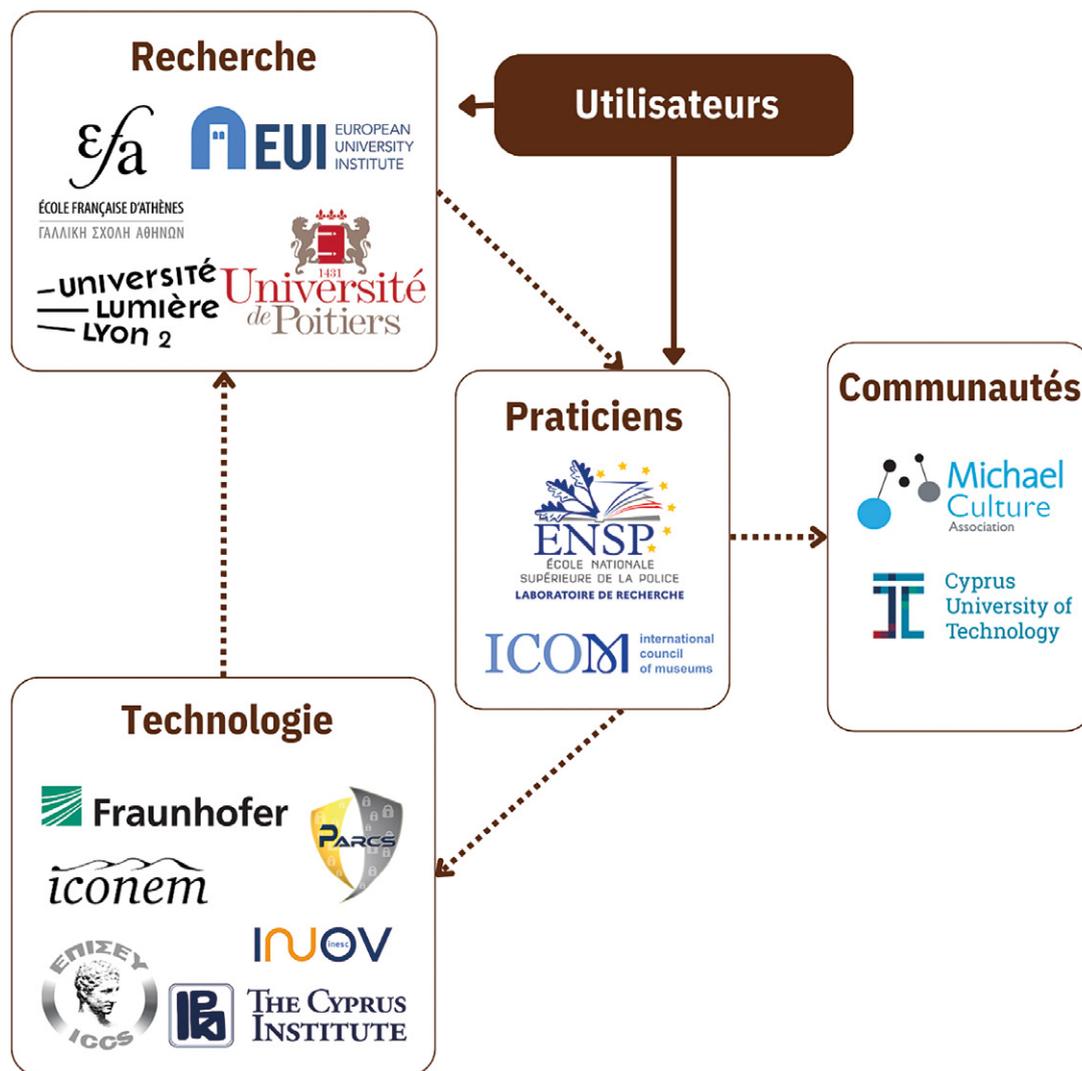


Schéma de la composition du consortium d'ANCHISE.

© Michael Culture Association

l'outil SFS Spectroscopy, élaboré par l'entreprise INOV, qui mesure la signature à fluorescence spectrale pour la datation du papier. Enfin, les outils ART-CH (ICCS) et la CYI Database du Cyprus Institute apportent des solutions d'analyse, de traitement et d'interconnexion des données.

Cette composition a pour objectif de permettre une meilleure détection du pillage, du trafic et d'assurer une traçabilité des artefacts.

### ICONEM au sein du projet ANCHISE (TB)

Si l'innovation portée par le projet ANCHISE est européenne, celle portée par ICONEM est le fruit d'un travail de longue date de l'entreprise française. Fondé en 2013 par l'architecte Yves Ubelmann, ICONEM est une start-up spécialisée dans la numérisation 3D de sites patrimoniaux. Active dans une trentaine de pays, ICONEM a pour mission de contribuer à la conservation et à la valorisation des sites historiques en les numérisant pour l'exploration, l'étude et la médiation. En partenariat avec de grands musées internationaux, ICONEM réalise par ailleurs des expositions et expériences numériques sur les sites patrimoniaux.

Depuis sa fondation, l'entreprise est mobilisée dans la lutte contre le pillage des sites. C'est effectivement

en constatant les conséquences du pillage à grande échelle sur certains sites au Proche et Moyen-Orient, pouvant aller jusqu'à l'effacement du site, que la numérisation 3D de ce patrimoine est apparue comme la seule garantie de sauvegarde d'une donnée scientifique et patrimoniale, par essence vouée à disparaître, mais soumise à un péril immédiat. Outre les pillages archéologiques, d'autres menaces anthropiques suscitent autant d'inquiétude et peuvent provoquer, voire catalyser, ces activités illicites, telles que les conflits, les constructions d'infrastructures, l'urbanisation non contrôlée, les mises en cultures intensives. ICONEM se spécialise ainsi dans la numérisation 3D, par photogrammétrie multiscalair, des sites du patrimoine culturel menacés par l'action de l'homme, parfois son inaction, le changement climatique et leurs conséquences.

La photogrammétrie multiscalair permet la numérisation de sites dans leur globalité, de leur proche contexte et des détails constitutifs. Une mission photographique sur place, respectant des protocoles spécialement développés pour garantir la couverture exhaustive d'un site (photographies au sol, à la perche, au drone, voire depuis des appareils d'aviation légère

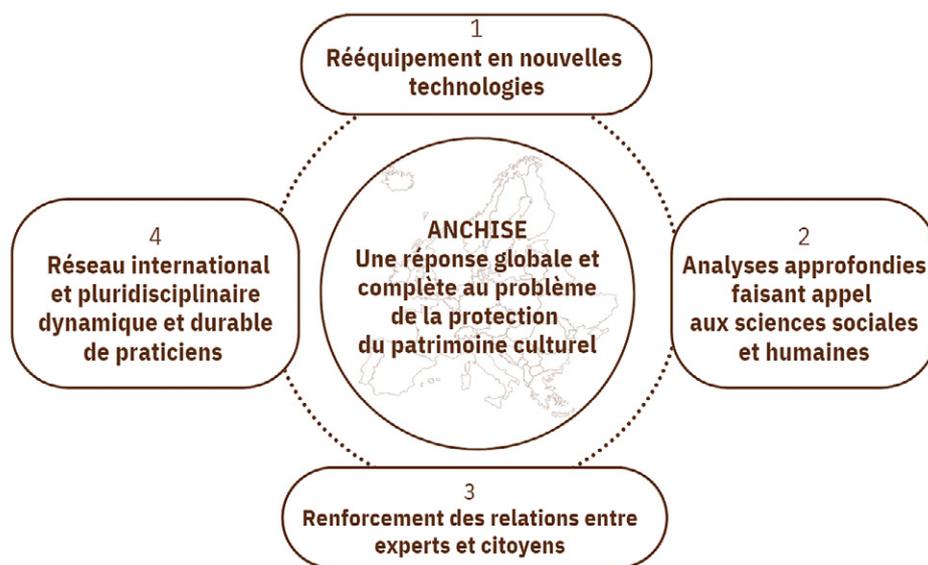


Schéma des objectifs du projet ANCHISE.

de tourisme), est suivie par un traitement des données acquises par des algorithmes qui génèrent, enfin, un nuage de points en très haute densité et résolution. Le double dématérialisé, à l'échelle et colorisé, est ainsi créé : une archive tridimensionnelle qui devient objet patrimonial, d'analyse et de diffusion.

Historiquement, les premiers recours à la numérisation pour l'analyse et le suivi par ICONEM d'un site pillé portaient sur ces mêmes régions qui avaient vu naître l'entreprise. Notamment, en 2014, l'UNESCO, représentée par son bureau en Irak, a mandaté ICONEM pour réaliser une étude globale des sites de Nimrud (Kalhu), Nineveh (Ninua) et Khorsabad (Dur-Sharrukin) dans le cadre du projet de « Conservation préventive des collections des musées et des sites du patrimoine culturel de l'Irak en risque imminent ». Les trois sites ont été numérisés en 2015 et 2016 et les traces de pillages furent ainsi détectées, caractérisées, interprétées et cartographiées. La prise en compte de l'imagerie satellitaire vint s'ajouter aux sources pour une compréhension globale et diachronique de l'évolution du phénomène. Plusieurs sites syriens, du Kurdistan irakien, iraniens et afghans furent eux aussi numérisés et analysés suivant la même méthode, et une étude du site de Dilbarjin, en Afghanistan, exclusivement fondée sur l'imagerie satellitaire, aura permis d'étudier une entreprise de pillage mécanisé d'une ampleur sans précédent en 2021. Plus récemment, les équipes d'ICONEM ont élargi cette étude à l'ensemble de la Bactriane et travaillent au développement de solutions automatisées et au recours à l'intelligence artificielle pour la détection et la caractérisation de pillages.

Forte de cette expérience, ICONEM rejoint à sa création le projet ANCHISE et développe depuis pour ce dernier son outil de contrôle des sites

archéologiques par analyse des vues satellitaires et de la photogrammétrie des sites. Les méthodes et protocoles préalablement développés, les algorithmes et les outils technologiques innovants seront réunis dans une suite opérationnelle et logicielle facilitatrice, pour une prise en main par le plus grand nombre de spécialistes concernés par ces enjeux, permettant la gestion d'un terrain patrimonial, de sa sauvegarde à son suivi – la première étape dans cet ensemble holistique de solutions technologiques pour la protection du patrimoine culturel.

En complément des innovations technologiques qui constituent la boîte à outils d'ANCHISE, la plateforme de connexion du projet remplit également un large rôle dans l'action d'ANCHISE. Ces solutions sont largement enrichies par les multiples travaux de recherche en sciences humaines et sociales développés au sein d'ANCHISE. Ce travail représentatif de la diversité des communautés professionnelles impliquées dans le projet comme membres du consortium ou futurs usagers vise à aboutir au développement de solutions de lutte contre le pillage et le trafic illicite de biens culturels adaptées et répliquables. ■



**Funded by  
the European Union**

Logo Soutien de l'Union européenne.  
© EU.

# Le projet HikarIA : étude et mise en valeur du patrimoine photographique par l'intelligence artificielle

Autour de 2007, le musée Guimet a fait l'acquisition auprès du collectionneur Joseph Dubois d'un fonds exceptionnel de photographies anciennes du Japon. Comprenant plus de 19 000 phototypes produits entre les années 1860 et 1920, le fonds Dubois est l'une des plus importantes collections de ce type au monde. Il est particulièrement représentatif du style de « l'école de Yokohama » (ou *Yokohama Shashin*), destiné à une clientèle étrangère et caractérisé par la représentation d'un Japon féodal et traditionnel dans des mises en scène aussi raffinées qu'artificielles et souvent mises en couleur à la main par des peintres japonais.

## ÉDOUARD DE SAINT-OURS

Conservateur des collections  
photographiques du musée Guimet

## CHRISTOPHER KERMORVANT

Président et directeur scientifique  
de la société Teklia



Felice BEATO, Tókaidô, 1863-1877. Tirage albuminé mis en couleur, AP11360, musée Guimet.

© MNAAG, Paris, Dist. GrandPalaisRmn/Image musée Guimet

### Les racines de la photographie japonaise au musée Guimet

La richesse du fonds Dubois lui confère une valeur inestimable pour la recherche en histoire des représentations. Son volume constitue en outre un excellent terrain d'expérimentation pour l'application de méthodes statistiques à l'analyse d'un corpus visuel. Enrichie d'environ 2 000 photographies acquises par le musée Guimet précédemment, la collection Dubois offre donc une occasion unique d'approfondir la compréhension des premières décennies de la photographie au Japon : son évolution esthétique, ses tendances iconographiques, l'économie des studios ou encore le rôle des peintres et des modèles.

Plus largement, elle ouvre aussi des pistes de recherche sur la circulation globalisée des images, les échanges Est-Ouest, la naissance de stéréotypes culturels et les pratiques touristiques à l'aube de la mondialisation.

Son volume et les contraintes de la conservation préventive des supports photographiques (sensibilité à la lumière et au climat, fragilité structurelle) compliquent la mise en valeur de cette collection. Néanmoins, depuis les années 1990, les progrès de la technologie numérique ont conduit les institutions à partager de plus en plus leurs collections en ligne, notamment par le biais d'expositions virtuelles et de bases de données. L'adoption du protocole IIIF (*International image interoperability framework*)<sup>1</sup> est



© MNAAG, Paris, Dist. GrandPalaisRmn/image musée Guimet

Tamura Kōzaburō, *Geisha jouant du shamisen*, début des années 1890. Tirage albuminé mis en couleur, AP15928, musée Guimet.



© MNAAG, Paris, Dist. GrandPalaisRmn/image musée Guimet

1. Voir : Véronique Cohener et Juliette Hueber, « L'utilisation des technologies IIIF dans les publications scientifiques à forts contenus visuels : les expérimentations de la pépinière de revues DeVisu, membre du réseau Repères », *Culture et Recherche*, n° 144, 2023, p. 101-103 ; Carine Prunet, Sophie Bertrand, Gaël Chenard, Stéphane Pillorget et Régis Robineau, « IIIF : découverte et interopérabilité sans frontière des images patrimoniales », *Culture et Recherche*, n° 143, automne-hiver 2022, p. 111-117.

Artiste non identifié, couverture, v. 1890. Laque et ivoire sur bois, album 069, collection Dubois, musée Guimet.



Moritomi Saegusa, *Futatsu-dō, Nikkō*, 1879. Tirage albuminé mis en couleur, AP15644, musée Guimet.



© MNAAG, Paris, Dist. GrandPalaisRmn/image musée Guimet

Apollinaire Le Bas, *Daimyō en armure tirant à l'arc*, 1864-1865. Tirage albuminé, AP21942, musée Guimet.

devenue une norme, permettant un accès standardisé aux images et aux métadonnées. Cette approche numérique permet la valorisation non invasive des images photographiques et améliore la gestion des collections, facilitant ainsi la réalisation d'études quantitatives approfondies. Il est cependant nécessaire, pour faciliter la découverte et l'analyse des collections, d'enrichir les métadonnées descriptives et de proposer de nouveaux outils d'exploration, par exemple en bénéficiant des avancées technologiques de l'intelligence artificielle.

### L'intelligence artificielle au service des professionnels du patrimoine photographique

L'avènement des modèles visuels d'apprentissage profond, tirant parti des réseaux de neurones convolutifs et des modèles *transformers*, a révolutionné l'analyse des collections photographiques. Entraînés sur des jeux de données provenant d'Internet, ces grands modèles de langue (*Large language models*, LLM) sont très performants pour analyser à la fois le texte et les images et sont désormais largement accessibles soit par des services en ligne, soit par l'utilisation de modèles diffusés en *open source*. Cette avancée technologique offre des capacités sans précédent pour décrire, catégoriser et comprendre les collections photographiques contemporaines (Wevers et Smits, 2020). Cependant, l'application de ces modèles



© MNAAG, Paris. Dist. Grand Palais Rmnv/image musée Guimet

Raimund von Stillfried-Ratenicz, *Combat de sumo : rikishi (lutteurs) et gyōji (arbitre) posant dans l'atelier, 1877-1880*. Tirage albuminé mis en couleur, AP11340, musée Guimet.

aux photographies anciennes dans le cadre de leur conservation ou pour leur étude historique présente des limitations importantes.

La première limitation de ces modèles vient de leurs conditions d'entraînement. Ces modèles ont été entraînés sur des corpus massifs de données issues du web, donc sur des photographiques modernes, principalement occidentales. Si leurs capacités de description sont très adaptées aux photographies contemporaines, elles sont en revanche trop limitées pour fournir une description précise de photographies éloignées de l'ensemble d'apprentissage, sur le plan tant temporel que géographique ou culturel.

La deuxième limitation concerne l'utilisation de vocabulaire contrôlé pour la description archivistique des photographies. Cette pratique est très différente de la création d'une légende pour une publication sur le web. Une description archivistique doit se conformer à des règles précises tant pour sa structure que pour son contenu. Si les LLM sont très efficaces pour suivre des consignes de mise en forme, il leur est pour l'instant difficile de produire une description en utilisant des vocabulaires contrôlés. En effet, les référentiels étant très détaillés et hiérarchiques, leur utilisation nécessite de suivre une démarche progressive de description, du plus général au plus spécifique, démarche que les LLM, en tant que modèles génératifs séquentiels, ont des difficultés à mettre en œuvre. Une solution consiste à effectuer plusieurs demandes de description au modèle



Ichida Sōta, *Jeune femme dans un jinrikisha tiré par un homme en mino*, 1870-1874. Tirage albuminé, AP10545, musée Guimet.

en suivant la hiérarchie du référentiel, mais cette approche augmente significativement la complexité du traitement.

Enfin, si les modèles d'intelligence artificielle ont progressé de manière spectaculaire ces dernières années, cette progression en qualité s'est accompagnée d'une progression non moins spectaculaire de la taille des infrastructures de calcul nécessaires à leur mise en œuvre et de leurs besoins énergétiques. Cette course au gigantisme a été soutenue par l'observation de capacités émergentes dans les LLM (Wei *et al.*, 2022), par exemple leur faculté à réaliser une tâche nouvelle uniquement à partir d'instructions (*prompting*), capacités qui n'apparaissent qu'avec l'augmentation significative de la taille des modèles. Celle-ci est telle qu'aujourd'hui seules quelques entreprises au niveau mondial sont capables d'entraîner les modèles les plus performants. L'utilisation de ces giga-modèles pose question pour le traitement de documents iconographiques à grande échelle dans les institutions patrimoniales, tant sur le plan économique que sur le plan énergétique.

Le projet HikarIA, porté par le Musée national des arts asiatiques – Guimet en partenariat avec la société Teklia, est financé en partie par la Caisse des dépôts

dans le cadre du plan d'investissement « France 2030 ». Actif de 2023 à 2026, il a pour objectif de dépasser ces limitations en développant de nouveaux outils pour la recherche photo-historique, la conservation et la mise en valeur du patrimoine photographique en améliorant l'indexation automatisée des photographies anciennes. Il comprend comme préalable la restauration, l'inventaire et la numérisation de la collection de photographies anciennes du Japon au musée Guimet. La mise en ligne de nouveaux outils d'analyse photographique basés sur l'IA permettra d'approfondir les connaissances actuelles sur la photographie au Japon durant les époques Bakumatsu et Meiji (1853-1912) et de faire connaître les richesses de ces collections au grand public. ■

### Bibliographie

Melvin Wevers et Thomas Smits, « The visual digital turn: Using neural networks to study historical images », *Digital Scholarship in the Humanities*, vol. 35, n° 1, avril 2020, p. 194-207. <https://doi.org/10.1093/lhc/fqy085>

Patricia Harpring, *Introduction to Controlled Vocabularies: Terminology for Art, Architecture, and Other Cultural Works*, Getty, 2010.

Jason Wei *et al.*, « Emergent abilities of large language models », *arXiv*, 2022.

# Hyperphantasia. Des origines de l'image

Depuis les profondeurs de la grotte jusqu'à celles de notre cerveau, *Hyperphantasia* crée un espace de rencontre entre quarante mille ans de technologies de représentation, à la recherche de l'origine des images. Retour sur le processus de création d'une œuvre inspirée des dernières avancées en intelligence artificielle.

### Les images des profondeurs de la Terre

La grotte ornée Chauvet Pont-d'Arc a été découverte en 1994 dans le sud de l'Ardèche. Le millier de peintures et gravures pariétales qui y sont figurées sont datées d'environ 38 000 ans. Le portail de la cavité s'étant effondré, son écosystème a été préservé, devenant ainsi une véritable capsule temporelle. Les traces humaines découvertes sont presque intactes et comptent parmi les plus anciennes du monde.

Pour la création d'*Hyperphantasia*, l'enjeu était de composer à partir d'un site préhistorique parmi les plus anciens afin de s'approcher au plus près des origines de l'image. Avec la volonté de restituer l'atmosphère de la grotte au plus juste, j'ai collaboré avec Jean-Michel Geneste, archéologue et ancien conservateur de Lascaux et de Chauvet. J'ai obtenu l'accès à une base de données scientifiques de l'espace

souterrain grâce au soutien de la conservation de la grotte Chauvet Pont-d'Arc et du Centre national de préhistoire (CNP)<sup>1</sup>.

Au paléolithique, nous descendions dans les profondeurs et l'obscurité de la caverne, avec ce désir d'y inscrire une œuvre de l'esprit sur les parois des grottes. En 2022, les sciences computationnelles nous permettent d'analyser de grandes quantités de données et de générer des prédictions. Ces nouvelles technologies permettent l'apparition de nouvelles interprétations invisibles pour l'être humain. J'ai pu classer les images et métadonnées en plusieurs corpus. Des réseaux de neurones artificiels ont été entraînés sur chacun de ces corpus afin de fabriquer de nouvelles images de la préhistoire pour la création de l'œuvre. La mécanique des réseaux crée une multitude de possibilités, intrigantes à analyser dans un contexte scientifique.

### JUSTINE EMARD

Artiste et artiste-professeure invitée au Fresnoy, studio national des arts contemporains (2021-2022 et 2023-2024)

1. Ressources numériques : ministère de la Culture, 2016, conservées au Centre national de préhistoire.



**Légende de l'œuvre (avec tous les remerciements de la rédaction pour l'aimable autorisation de l'auteur) :**

*Hyperphantasia. Des origines de l'image*  
Justine Emard, 2022.

Installation : sculptures & film 12'  
Une production Le Fresnoy, studio national des arts contemporains, projet réalisé dans le cadre de la résidence hors les murs de l'Observatoire de l'Espace, le laboratoire culturel du CNES  
Crédits : *Hyperphantasia*, Justine Emard 2022. © Justine Emard/Adagp, Paris – Une production Le Fresnoy, studio national des arts contemporains

Photographie de Quentin Chevrier pour le Grand Palais immersif, 2024.

2. La paréidolie est une expression de cette tendance du cerveau à créer du sens en assimilant des formes aléatoires à des formes qu'il a déjà référencées.

Le phénomène de paréidolie<sup>2</sup>, le cerveau reconstituant des images dans la roche, a certainement inspiré les femmes et les hommes de la préhistoire. L'exploration de l'espace latent recrée ce phénomène, le cerveau humain cherche du sens dans les milliers d'images générées. Les résultats obtenus ont été observés et interprétés ensemble avec Jean-Michel Geneste afin que l'atmosphère de la grotte puisse être restituée, entre sensations conscientes et réminiscences.

Les images générées ainsi que leurs espaces latents ont constitué la matrice pour animer une paroi

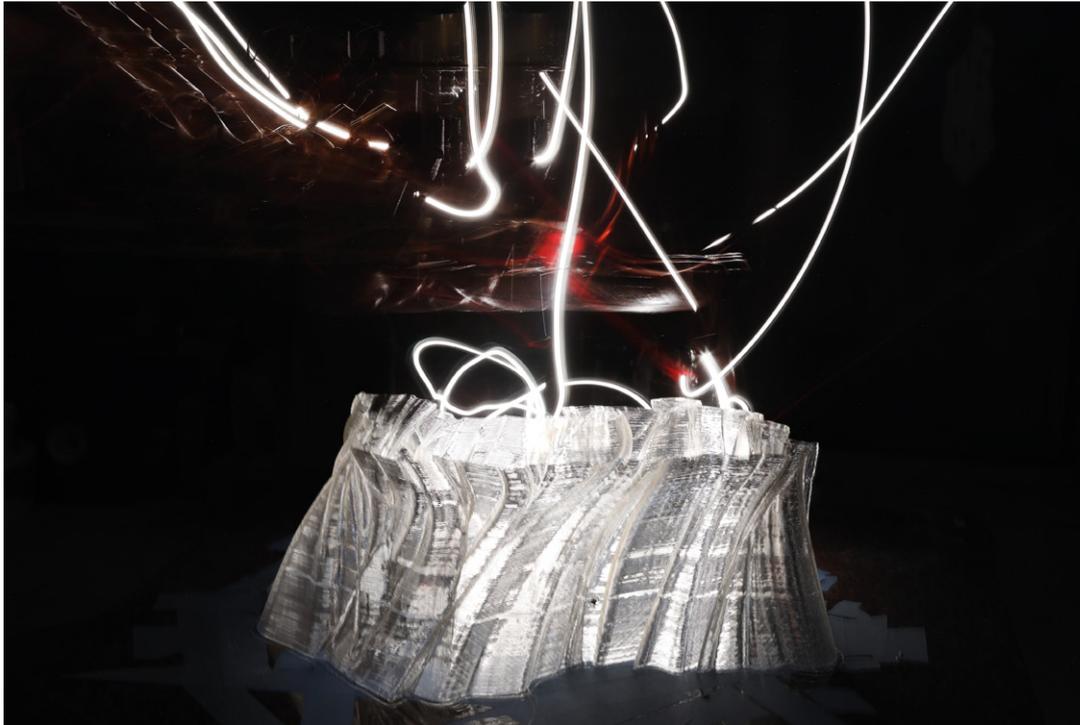
vidéographique, laissant entrevoir une « nouvelle » préhistoire, un imaginaire parallèle à celui de nos ancêtres. Les traces de l'expression humaine se mêlent à la géomorphologie qui se dessine devant le spectateur. Une organicité vivante dans l'image fait écho à l'écosystème de la grotte.

Un fil narratif se dessine au fur et à mesure de l'apprentissage de la machine, avec l'apparition des figures générées à partir des différents corpus. D'abord des parois griffées; apparaissent ensuite les premières gravures au doigt, en passant par le premier trait au



Vue d'exposition *Panorama 24*.  
*L'autre côté*, Le Fresnoy, studio national  
des arts contemporains  
(sur les deux photographies).





Processus de création.

charbon noir sur la paroi. Puis un premier animal se forme, suivi par les grands panneaux scéniques. La maladresse et les erreurs de la machine font partie du montage de l'œuvre, laissant une place pour l'émotion que peut susciter l'imperfection.

### L'écologie des images

L'entraînement de réseaux de neurones à partir d'un corpus spécifique d'images s'étend sur plusieurs jours. Il s'agit d'un processus long qui nécessite une grande force computationnelle. Avec l'aide de mes complices codeurs, nous avons orchestré l'entraînement sur un serveur à distance, mais pas n'importe lequel. Il m'importait de connaître le lieu où les images allaient être entraînées ainsi que le sort de la chaleur dégagée. J'ai collaboré avec une compagnie de serveurs basée à Paris, qui possède plusieurs *data centers* qui appliquent une politique de redistribution de la chaleur – ce dont j'ai pu obtenir la confirmation.

### De l'espace des rêves

Lorsque l'on sombre dans le sommeil, nos absences psychiques nous déconnectent du monde réel, une absence lors de laquelle, bien que physiquement dans le monde, nous disparaissions. En 2021, une mission du CNES (Centre national d'études spatiales) et de l'ESA (Agence spatiale européenne) étudie l'enregistrement du sommeil dans l'espace.

Dans le cadre de ma résidence hors les murs à l'Observatoire de l'espace du CNES, j'ai bénéficié d'un accès exceptionnel aux données issues de l'expérience. Les signaux enregistrés lors du sommeil des astronautes sont ceux de leur activité cérébrale. À la surface du crâne, des électrodes captent et amplifient un signal électrique qui doit être lu et décrypté ensuite. Plusieurs phases de sommeil sont identifiées en neurologie. Le stade d'éveil, celui de somnolence,



le sommeil confirmé, le sommeil profond puis enfin le sommeil paradoxal, soit le sommeil du rêve. Au cours de ce dernier stade, l'activité cérébrale est intense, comparable à celle de l'éveil. Paradoxalement, le corps est complètement inerte, hormis des mouvements oculaires très rapides. En collaboration avec la neurologue Rachel Debs (CHU de Toulouse), j'ai élaboré un répertoire de vingt-trois rêves enregistrés dans la Station spatiale internationale (ISS).



Vue d'exposition *Panorama 24*.  
L'autre côté, Le Fresnoy, studio national  
des arts contemporains.

Les signaux encéphalographiques des vingt-trois rêves de l'espace deviennent la matière de création de sculptures en impression 3D transparentes. Modélisée par un logiciel d'architecture paramétrique, la matérialisation des formes est réalisée par un bras robotique. Celui-ci élève la matière dans une interprétation mathématique, dans une plasticité soumise à la gravité terrestre. Les vingt-trois rêves de l'espace sont révélés par la lumière de l'installation, participant à la géomorphologie d'un nouvel espace multidimensionnel. *Hyperphantasia* dessine des connexions rêvées entre les deux univers, extrudées à partir de bases de données scientifiques réelles. L'installation propose une lecture « ré-imaginée » du monde et de ses possibles, en connectant les technologies du paléolithique aux dernières avancées en intelligence artificielle.

### Du cerveau à la grotte

Originellement, le concept grec de la *phantasia* mêle rêve, imagination et fantôme pour nous guider jusqu'à l'idée de l'image, de « ce qui apparaît ». Cette apparition de l'image se situe à la surface de notre cortex visuel, sur ce que nous pourrions appeler notre « cinéma intérieur ». La même zone où s'activent les images de nos rêves, nos souvenirs et notre imagination.

Le bruit des neurones qui structure le son de l'installation a été enregistré par mes soins lors d'une opération du cerveau. Ce son organique insufflé une dimension supplémentaire à l'œuvre, celle du

subconscient. Le bruit est capté au niveau des ganglions de la base, la partie du cerveau qui régule ce qui a été appris et devient automatiquement pilotée par notre cerveau. Le bruit des neurones est un grain sonore, presque le crépitemment d'un feu, révélateur des images sur les parois des grottes et les animant dans un mouvement proche des origines du cinéma. Organique et virtuel, le neurone devient le dénominateur commun à la structure de l'installation. Après quarante mille ans d'évolution, nous regardons ces images extraites du cerveau de nos ancêtres et inscrites dans la matière. Aujourd'hui, l'intelligence artificielle leur donne une nouvelle présence artistique.

Il y a aussi quelque chose de vertigineux à penser au fait qu'un humain ait dessiné une image de mammoth il y a quarante mille ans et qu'on l'identifie toujours aujourd'hui. Puis il y a l'interprétation de la machine : contributrice à part entière à la nouvelle création de la grotte, elle perce des ouvertures vers l'avenir des images, depuis la génération d'images inédites de la préhistoire par un modèle de *machine learning* jusqu'à l'extrusion de sculptures de rêves de l'espace. On assiste ainsi à la naissance de nouvelles images issues des profondeurs de nos imaginaires qui vont fusionner et se synchroniser.

Des profondeurs de la grotte à l'espace et de la préhistoire jusqu'à aujourd'hui, *Hyperphantasia* déploie un monde en plusieurs dimensions, telle une nouvelle invention. ■

# Pour une théorie visuelle des arts génératifs interactifs

Alors que les Intelligences artificielles (IA) entraînent le monde dans une révolution systémique, emportant bon nombre des fondements qui régissent nos vies sociales, politiques, économiques et même spirituelles, nous interrogeons l'impact de ces bouleversements sur notre rapport aux images, à travers l'étude des arts génératifs interactifs. Il s'agit de définir, recenser, analyser et catégoriser ces œuvres dans le champ des arts visuels, afin de comprendre comment elles rejouent profondément notre relation aux images et notre conception même de ce que peut être une image. Notre étude doctorale vise à proposer un outillage théorique adapté à ces nouvelles formes de création ; cette brève communication cherche à en brosser rapidement quelques enjeux.

## De l'art génératif interactif...

En 2023, Miguel Chevalier participe à l'exposition « Ce que disent les plantes » au Grenier à sel d'Avignon. Il y présente *Meta-Nature IA*, qu'il envisage comme un « jardin virtuel génératif ». Cette œuvre repose sur une base de données d'images de végétaux, à la fois collectées et reproduites de manière réaliste ou plus abstraite, et même engendrées par IA en réponse à des *prompts*. À partir de cette base de plantes réelles et imaginaires, l'œuvre engendre d'elle-même des espèces fantasmagoriques, des arbres, fleurs et feuillages qui naissent, croissent et meurent, métamorphosant continuellement le jardin numérique déployé sur l'écran. L'œuvre échappe partiellement à la main de l'artiste, le principe de génération – producteur des images – étant inclus en elle.

Les caractéristiques de cette œuvre nous renvoient à l'étymologie du mot « génératif », dérivant du supin latin *generatum*, que l'on pourrait traduire par « pour produire » ou « pour créer ». Une œuvre est donc générative si une partie de sa manifestation formelle est conditionnée par sa propre structure. En d'autres termes, dans le champ des arts visuels, une œuvre générative est un dispositif dynamique partiellement autonome, conçu pour produire des images.

Dans les années 1960, l'artiste Hans Haacke s'intéresse à la cybernétique, à la biologie et tout particulièrement aux travaux de Ludwig von Bertalanffy,

à travers son ouvrage *General System Theory* (1968) : l'organisme vivant y est décrit comme un système ouvert, constamment en interaction avec l'environnement. C'est à partir de ces réflexions qu'Hans Haacke conçoit le *Condensation Cube*, un cube de plexiglas fermé hermétiquement, dans lequel se trouve piégé un fond d'eau. La relation du cube avec l'espace de monstration conduit à la condensation de la vapeur d'eau qu'il contient, qui finit par ruisseler sur ses parois.

L'œuvre interactive est ainsi dynamique dans son intention, et réagit formellement à son environnement – ici, les données météorologiques, influencées par la présence dans l'espace d'agents humains. Dit autrement, son évolution provient de la transformation d'un entrant (*input*) choisi par l'artiste en sortant (*output*) perçu par le spectateur – on est proche d'un système hétéronomique.

C'est au croisement des propriétés du génératif et de l'interactif – entre autonomie et hétéronomie – que se trouve toute la portée de notre objet d'étude, dont nous pouvons proposer cette première définition, dans le champ des arts visuels : « un artefact conçu pour produire de l'image, évoluant de manière plus ou moins autonome et en réaction à une partie de son environnement ».

## GRÉGOIRE PRANGÉ

Doctorant programme Sciences, arts, création, recherche (SACRe), École normale supérieure (ENS) – Université Paris Sciences & Lettres (PSL)



© Miguel Chevalier

Miguel Chevalier, *Meta-Nature IA*, œuvre de réalité virtuelle générative, 2023. Exposition « Ce que disent les plantes », Le Grenier à sel, Avignon. Logiciel : Claude Micheli.

### ... aux « images sensibles »

Cette définition étant posée, vient la première grande problématique de notre étude : les images engendrées par ces œuvres sont-elles ontologiquement singulières ? De manière métaphorique – et sans pousser l’analogie –, nous serions tentés de penser l’image générative interactive comme un organisme autonome dont l’évolution dépend à la fois du code génétique qui est le sien et de l’environnement dans lequel il se trouve. Pour cette raison, nous proposons dans le champ des arts visuels la notion d’« images sensibles » : n’ayant pas accès à la structure interne de l’œuvre, le public se trouve en effet face à des formes qui semblent interagir avec leur environnement – dont parfois le spectateur lui-même – et évoluer en fonction de cette perception « digérée ».

Ainsi, ces images, à la fois perçues et percevant, douées d’une relative indépendance et d’une capacité à incorporer leur environnement, semblent agir comme des corps à part entière, jouant cette proposition de Maurice Merleau-Ponty dans *L’œil et l’esprit* : « Un corps humain est là quand, entre voyant et visible, entre touchant et touché, entre un œil et l’autre, entre la main et la main se fait une sorte de recroisement, quand s’allume l’étincelle du sentant-sensible<sup>1</sup>. »

### De l’énaction à l’agentivité perçue

À la suite de Merleau-Ponty, nous pourrions conduire cette considération de l’œuvre-corps dans le champ des sciences cognitives vers le concept d’énaction (qui encore aujourd’hui reste un grand défi pour les IA) tel que défini par Francisco Varela, Evan Thompson et Eleanor Rosch<sup>2</sup> : pour un agent cognitif, la nécessaire complémentarité entre l’autonomie – capacité à se maintenir dans une structure stable – et l’accouplement – la nécessité de maintenir sa relation avec l’environnement, contre qui il se définit. Ce principe d’énaction nous conduit également à considérer l’art génératif interactif en regard du principe d’*autopoïèse* – propriété d’un système à se produire lui-même, en interaction avec son contexte – proposé pour l’esprit humain par Humberto Maturana et Francisco Varela<sup>3</sup>.

Ici encore, il n’est pas question de dérouler des analogies abusives transformant l’œuvre d’art en agent cognitif autonome, doué d’une volonté propre et conscient de sa relation à l’environnement. Ni même de nous inscrire dans une tradition vitaliste cherchant l’animation de l’image en dehors de la matière. Il s’agit plutôt de questionner l’agentivité (*agency*) perçue de ces images, qui remet en perspective nos présupposés sur l’art, et surtout notre propre agentivité – la révélant parfois.

1. Maurice Merleau-Ponty, *L’œil et l’esprit*, Gallimard, 1964, p. 21.

2. Francisco Varela, Evan Thompson et Eleanor Rosch, *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*, MIT Press, 1992.

3. Voir Humberto Maturana et Francisco Varela, *Autopoiesis and Cognition. The realization of the Living*, D. Reidel Publishing Company, 1980, p. 78-79.

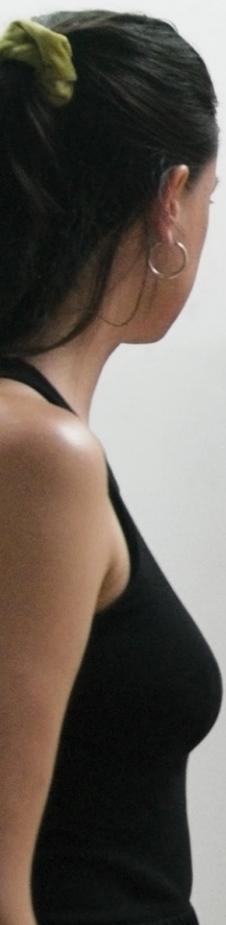
À l'aide d'une caméra thermique détectant la chaleur et d'un système de particules en visualisant la dispersion, l'œuvre *Thermal Drift Density Map* de Rafael Lozano-Hemmer donne à voir la dispersion de la chaleur corporelle sous forme de quanta s'éloignant lentement du spectateur. Les images engendrées visualisent un portrait vital tout autant que spectral, qui révèle la porosité et les échanges constants entre le corps et l'atmosphère qui l'entoure. Comme de nombreuses *images sensibles*, cette œuvre – bien que reposant sur un système génératif sommaire à l'autonomie réduite – invite à une expérimentation du corps propre tout en mettant en place une relation humain-machine transformatrice: elle incarne un *être au monde* que nous ne pouvons ressentir sinon.

Ainsi, à la jonction du génératif et de l'interactif, ces images éprouvent la plupart de nos cadres théoriques et dépassent complètement les distinctions classiques

entre *image* et *réfèrent*, *présentation* et *représentation*, *fabrication* et *participation*. Des images d'un nouvel ordre donc, qui ne resteront pas confinées dans le champ de l'art, et dont il nous faut comprendre la nature et l'impact. ■

#### Bibliographie

- Sofian Audry, *Art in the Age of Machine Learning*, MIT Press, 2021.  
Hans Belting, *Pour une anthropologie des images*, Gallimard, 2004.  
Georges Didi-Huberman, *Ce que nous voyons, ce qui nous regarde*, Les Éditions de Minuit, 1992.  
Olivier Grau, *Virtual Art: From Illusion to Immersion*, MIT Press, 2002.  
Frank Popper, *Art, action et participation. L'artiste et la créativité aujourd'hui*, Klincksieck, 1980.



Rafael Lozano-Hemmer, *Thermal Drift Density Map*, logiciel de visuel génératif, ordinateur, caméra thermique, écran, dimensions variables, 2022.  
© Antimodular Studio

# Pour une intelligence artificielle responsable au service d'une création musicale, inventive et diverse

Face au mythe de l'automatisation des tâches créatives, des visions alternatives sont aujourd'hui nécessaires à la survie et à la diversité de l'écosystème musical. L'Institut de recherche et coordination acoustique/musique (Ircam), où la création musicale rencontre la recherche scientifique et le développement technologique, défend un artisanat musical intégrant l'intelligence artificielle de manière responsable et inventive, depuis la conception des algorithmes jusqu'à leurs applications dans la création.

## FRÉDÉRIC BÉVILACQUA

Directeur de recherche, Institut de recherche et coordination acoustique/musique (Ircam)

## JEAN-LOUIS GIAVITTO

Directeur de recherche, UMR CNRS 9912 Science et technologie de la musique et du son (STMS)

## FRANCK MADLENER

Directeur de l'Ircam

## NICOLAS OBIN

Enseignant-chercheur, maître de conférences à la faculté des sciences et d'ingénierie de Sorbonne Université et chercheur, UMR CNRS 9912 STMS

## AXEL ROEBEL

Directeur de recherche, Ircam

## PIERRE SAINT-GERMIER

Chargé de recherche, UMR CNRS 9912 STMS, Ircam

## Des défis à relever

L'émergence spectaculaire de nouvelles technologies issues de l'Intelligence artificielle (IA) promet de nouvelles opportunités pour la création artistique, en particulier sonore et musicale. Si l'IA propose des avancées qui correspondent particulièrement bien aux attentes des industries créatives et culturelles, elle amplifie les problèmes écologiques et éthiques du numérique, et soulève des défis économiques et artistiques qui bouleversent l'écosystème de la création musicale.

Un défi artistique et culturel, d'abord.

La concentration des moyens technologiques entre quelques acteurs dominants, la standardisation des algorithmes et la persistance inévitable de biais dans les bases de données utilisées pour l'apprentissage font courir un risque d'uniformisation accrue des musiques produites. Les musiques traditionnelles, les musiques expérimentales, et plus généralement les musiques échappant aux canons de l'industrie musicale, sont condamnées à être toujours plus marginalisées. Si l'on ajoute que les produits des IA sont amenés eux aussi à entrer dans les prochaines bases d'apprentissage, les risques d'appauvrissement sont bien réels. Le problème de la diversité culturelle ne concerne pas uniquement la création musicale, mais constitue un véritable défi anthropologique pour nos sociétés.

Un défi économique, ensuite.

Une récente étude de Goldmedia commandée par la Société des auteurs, compositeurs et éditeurs de musique (SACEM) estime que d'ici 2028, 27 % des revenus des créateurs de musique seront menacés par l'IA, soit 2,7 milliards d'euros sur la période 2023-2028. Par exemple, les applications de création de contenus musicaux à base de *prompts* textuels<sup>1</sup>, permettant d'obtenir en quelques secondes un morceau de musique répondant à une brève description verbale, sans payer de cachet ni de droits d'auteur, visent clairement à concurrencer une offre de création musicale prise en charge jusqu'ici par des humains. Il faut s'attendre dans les prochaines années à des déséquilibres majeurs entre la production industrielle et l'artisanat de la création dans l'écosystème musical.

## Une autre IA est possible

Face à ce constat, nous souhaitons promouvoir une vision de l'IA au service de projets artistiques singuliers, susceptible de combiner dans un esprit d'expérimentation et d'hybridation savoir-faire musicaux et technologiques, pour que l'IA contribue à un enrichissement responsable de la création dans toute sa diversité<sup>2</sup>.

La responsabilité commence dès la conception des algorithmes. En particulier, la recherche sur les IA frugales, qui s'attaque directement aux problèmes

1. [https://www.lemonde.fr/pixels/article/2024/03/29/suno-l-ia-qui-genera-des-chansons-a-peu-pres-credibles\\_6224911\\_4408996.html](https://www.lemonde.fr/pixels/article/2024/03/29/suno-l-ia-qui-genera-des-chansons-a-peu-pres-credibles_6224911_4408996.html) (site consulté le 17 septembre 2024).

2. [https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/12/26/l-intelligence-artificielle-risque-de-devenir-un-luxe-hors-de-portee-pour-les-moins-bien-lotis\\_6207771\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/12/26/l-intelligence-artificielle-risque-de-devenir-un-luxe-hors-de-portee-pour-les-moins-bien-lotis_6207771_3232.html) (site consulté le 17 septembre 2024).



Apollon d'après Pierre de Cortone, Cornelis II (le Jeune) Bloemaert (graveur) et Pierre de Cortone (Inv. n° GDUT694), Petit Palais, musée des Beaux-Arts de la Ville de Paris : <https://apicollections.parismusees.paris.fr/iiif/160020675/manifest> ; <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=Apollon+%2B+lyre&title=Special:MediaSearch&fulltext=Rechercher+&type=image>

© Domaine public

d'efficacité énergétique et écologique de l'IA<sup>3</sup>, doit à terme proposer des alternatives soutenables aux IA actuelles pour réduire considérablement les besoins en énergie et en données. Cette conception va de pair avec l'emploi de bases de données raisonnées, adaptées aux applications visées et respectueuses du consentement des personnes dont elles émanent, à l'opposé de la course actuelle pour une collecte de données toujours plus massives, exploitant les zones grises des législations actuelles. Plus généralement, de nouveaux modèles économiques permettant aux artistes d'être diffusés et rémunérés équitablement doivent être imaginés et explorés.

Dans la lignée des préconisations issues de la loi européenne sur l'intelligence artificielle (l'*EU AI Act*)<sup>4</sup> sur la transparence des données utilisées pour les apprentissages, nous promovons également la transparence des usages, depuis ses moyens jusqu'à ses finalités. Au niveau des fins, cela implique d'informer systématiquement le public sur l'utilisation d'IA dans la production de contenus diffusés en ligne et de favoriser leur traçabilité de la production à la diffusion. Au niveau des moyens, cela passe par l'explicitation des procédés mis en œuvre lors de la production de contenus avec des IA, comme cela a été fait pour l'appel du 18 juin du général De Gaulle<sup>5</sup> dont la reconstitution sonore en janvier 2023, par une équipe de chercheurs de l'Ircam et de sa filiale Amplify, repose sur des choix d'interprétation humains.

Au-delà de ces propositions concrètes, nous souhaitons promouvoir la diversité aussi bien dans les innovations technologiques que dans les usages de l'IA pour la création musicale. À côté de la génération de morceaux de musique à base de *prompts* textuels, il faut explorer d'autres expériences (participatives, immersives) et d'autres modes d'interaction, articulant son et geste, improvisateurs et machines, artistes et publics. La diversité et la pluralité des pratiques technologiques

et musicales sont une condition nécessaire à la soutenabilité de l'écosystème de la création, dans lequel les musiques majoritaires et minoritaires se nourrissent mutuellement. En outre, les mécanismes de marchés économiques seuls sont probablement insuffisants pour soutenir la diversité à l'ère des IA. Nous appelons à réaffirmer le principe d'exception culturelle et à le généraliser, en particulier par la création de mécanismes de redistribution encadrés par les pouvoirs publics à l'échelle européenne.

L'IA, comme les innovations technologiques qui jalonnent l'histoire de la musique, est un outil puissant pour stimuler le désir, le plaisir, l'imaginaire de la création et de l'écoute. Plus que jamais, il appartient aux musiciens de s'approprier ces outils pour façonner le présent et les futurs de la musique. ■

3. [https://www.lemonde.fr/pixels/article/2024/03/25/intelligence-artificielle-le-bilan-carbone-de-la-generation-d-images-de-textes-ou-de-sous-titres\\_6224138\\_4408996.html](https://www.lemonde.fr/pixels/article/2024/03/25/intelligence-artificielle-le-bilan-carbone-de-la-generation-d-images-de-textes-ou-de-sous-titres_6224138_4408996.html) (site consulté le 17 septembre 2024).

4. Il s'agit du premier règlement complet sur l'IA établi par un organisme de réglementation important. La loi classe les applications de l'IA dans trois catégories de risque. Premièrement, les applications et les systèmes qui créent un risque inacceptable, tels que les systèmes de notation sociale gérés par le gouvernement, comme ceux utilisés en Chine, sont interdits. Deuxièmement, les applications à haut risque, comme un outil de balayage de CV qui classe les candidats à l'emploi, sont soumises à des exigences légales spécifiques. Enfin, les applications qui ne sont pas explicitement interdites ou répertoriées comme présentant un risque élevé échappent en grande partie à la réglementation :

<https://artificialintelligenceact.eu/fr/> (site consulté le 17 septembre 2024).

Voir : [https://www.lemonde.fr/pixels/article/2024/02/02/les-pays-europeens-approuvent-une-premiere-loi-pour-reguler-l-intelligence-artificielle\\_6214445\\_4408996.html](https://www.lemonde.fr/pixels/article/2024/02/02/les-pays-europeens-approuvent-une-premiere-loi-pour-reguler-l-intelligence-artificielle_6214445_4408996.html) (site consulté le 17 septembre 2024).

5. [https://www.lemonde.fr/international/article/2023/01/18/comment-le-monde-a-tente-de-recreer-l-appel-du-18-juin-en-reproduisant-la-voix-du-general-de-gaulle\\_6158271\\_3210.html](https://www.lemonde.fr/international/article/2023/01/18/comment-le-monde-a-tente-de-recreer-l-appel-du-18-juin-en-reproduisant-la-voix-du-general-de-gaulle_6158271_3210.html) (site consulté le 17 septembre 2024).



© Bulbman Megawattbulbman-GNU (domaine public).

Bâtiment de l'Ircam à Paris, 17 avril 2006 : <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ircam.jpg>

# Le langage des partitions musicales face à l'intelligence artificielle

Dans le domaine de l'informatique musicale, l'analyse et la génération automatique de partitions font l'objet de multiples recherches, en grande partie inspirées par des algorithmes d'Intelligence artificielle (IA) conçus à l'origine pour le traitement de contenus textuels. Le projet Music NLP, collaboration entre le Studio de création et de recherche en informatique et musiques expérimentales (SCRIME) à l'Université de Bordeaux, l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (INRIA) et le Centre de recherche en informatique signal et automatique de Lille (CRISAL) à l'Université de Lille, mène une réflexion sur ce détournement d'outils, ses limites techniques et la manière dont il nous interroge à un plus haut niveau sur le parallèle entre musique et langage naturel.

## LOUIS BIGO

Professeur des universités, directeur du Studio de création et de recherche en informatique et musiques expérimentales (SCRIME) – Université de Bordeaux, CNRS, Institut polytechnique de Bordeaux, Laboratoire bordelais de recherche en informatique (LaBRI), UMR 5800

## MIKAELA KELLER

Maîtresse de conférences, Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISAL), UMR CNRS 9189 – Université de Lille, Centrale-Lille, INRIA, Institut Mines-Télécom Nord Europe

## DINH-VIET-TOAN LE

Doctorant en informatique musicale, Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISAL), UMR CNRS 9189 – Université de Lille, Centrale-Lille, INRIA, Institut Mines-Télécom Nord Europe

L'Intelligence artificielle (IA) a un impact croissant dans les différents rapports que nous entretenons à la musique. Elle intervient dans la conception d'outils destinés à enrichir la composition, la performance, l'écoute, l'analyse ou encore la pédagogie. Au-delà du développement d'outils pour les musiciens, mettre l'IA à l'épreuve des données musicales offre un cadre original pour étudier et améliorer notre compréhension des langages de la musique, aussi variés et multiples soient-ils.

## Intelligences textuelles et musicales

Une large partie des recherches actuelles dédiées à l'analyse et à la génération automatique de partitions musicales emploient des techniques d'IA conçues à l'origine pour le traitement de textes<sup>1</sup>, notamment les réseaux de neurones *Transformers*, à la base de programmes tels que ChatGPT. Cet emprunt est largement motivé par la performance remarquable de ces modèles dans le domaine du texte, mais aussi par l'assimilation courante de la musique à une sorte de *langage*. Bien que produisant des résultats de plus en plus spectaculaires, les compétences musicales des *Transformers* demeurent cependant rarement explicables à cause de la complexité de ces algorithmes, souvent comparés à des « boîtes noires » et dont la performance repose sur un accès à des volumes massifs de données de référence. Les recherches du projet Music NLP visent à améliorer l'explicabilité de ces modèles dans le domaine musical et à proposer ainsi un cadre original pour l'étude des différences entre musique et langage naturel.

## « Langages » dans les partitions

Le terme de « langage musical » semble largement induit par l'utilisation de formules codifiées représentatives d'un « style musical ». Le répertoire classique abonde de ces éléments, parmi lesquels la « tonalité », la « texture », les « cadences » et la « structure », qui font l'objet de nombreuses recherches en analyse musicale computationnelle. L'idée de « langage musical » se manifeste également dans l'emprunt par les musiciens de termes propres au langage naturel. La partition est par exemple associée à un « discours musical », structuré en phrases, incluant même des mécanismes de « questions/réponses ». Touchant au concept de sémantique, propre au domaine du langage naturel et non à celui de la musique, ces analogies atteignent cependant rapidement leurs limites<sup>2</sup>. La tendance du musicien à emprunter des termes au domaine du langage naturel illustre probablement davantage une complexité à décrire la musique qu'une réelle proximité entre les deux domaines.

## Relations entre « mots », relations entre « notes »

Les algorithmes *Transformers* ont été conçus pour identifier des relations entre les mots d'un texte, via un mécanisme appelé « auto-attention », avec l'objectif de reconstituer des représentations sémantiques abs-traites. La transposition de ce procédé aux éléments constituant une partition musicale, typiquement les notes et les accords, nous interroge sur la nature de l'information véhiculée par la partition et de la manière

1. Dinh-Viet-Toan Le, Louis Bigo, Mikaela Keller et Dorien Herremans, « Natural language processing methods for symbolic music generation and information retrieval: A survey », *arXiv*, 2024 (voir aussi : <https://hal.science/hal-04621444/file/main.pdf>).

2. Ray Jackendoff, « Parallels and nonparallels between language and music », *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, vol. 26, n° 3, 2009, p. 195-204.

Les 8 dernières mesures de la partie d'exposition du premier mouvement de la *Sonate facile* (sonate pour piano n° 16, K. 545) de Wolfgang Amadeus Mozart avec plusieurs éléments typiques du langage classique annotés. Les textures comprennent un motif de « question et réponse » entre les deux mains (1.a), un accord d'accompagnement répété (1.b), une « basse d'Alberti » (1.c), des accords *sparses* (1.d), une « cadence authentique parfaite » (2), suivie d'une répétition cadentielle V/I et d'un « triple coup de marteau » concluant l'extrait (3) [https://hal.science/tel-04433299/file/hdr\\_bigo.pdf](https://hal.science/tel-04433299/file/hdr_bigo.pdf) (figure 2.1. p. 10).

dont elle se distingue de la sémantique d'un texte. Les travaux que nous menons analysent les raisons pour lesquelles l'auto-attention parvient malgré ces différences à apprendre dans les partitions des phénomènes musicaux abstraits tels que l'harmonie fonctionnelle, pour laquelle nous constatons par exemple une surprenante tendance de l'auto-attention à se référer au futur dans la partition pour expliquer le contexte harmonique présent.

### Structures séquentielles

La nature temporelle de la musique favorise sa représentation informatique sous la forme de « séquences d'éléments », typiquement des notes ou des accords, comparables aux séquences de caractères ou de mots constituant un texte. Bien que cette similarité de structure facilite le transfert d'algorithmes entre les deux domaines, représenter la musique sous la forme de simples séquences limite l'expression de deux caractéristiques qui lui sont propres. La première est la simultanéité, inhérente à la notion d'harmonie. La seconde est le rythme, induit par des distances temporelles précises entre les notes. Une variété de stratégies a été proposée pour exprimer ces concepts

dans des séquences, généralement *via* l'introduction d'éléments additionnels qui rendent compte de la temporalité musicale. Une partie des recherches du projet Music NLP vise à améliorer l'expressivité musicale de ces représentations, en substituant par exemple les hauteurs de notes par les intervalles qui les séparent, que ce soit entre des notes simultanées ou successives, ou en élargissant le vocabulaire en y ajoutant des « super-valeurs » représentant des sous-séquences de valeurs courantes dans le répertoire.

L'adaptation d'algorithmes de texte pour le traitement de partitions nous invite à une réflexion sur la spécificité de la musique et la complexité de sa structure. L'élaboration d'architectures de réseaux de neurones imaginés précisément pour la modélisation des éléments constituant une partition représente un défi majeur pour notre communauté dans les années à venir. Cet objectif s'ajoute par ailleurs à celui de constituer des modèles « explicables » contribuant à améliorer notre compréhension du répertoire musical, et dont l'entraînement requiert des ressources énergétiques raisonnables<sup>3</sup>. ■

3. Lasse F. Wolff Anthony, Benjamin Kanding et Raghavendra Selvan, « Carbontracker: Tracking and predicting the carbon footprint of training deep learning models », *arXiv*, 2020.



Représentation d'un extrait de partition par une séquence de valeurs. La temporalité des notes est encodée grâce à l'ajout de valeurs dédiées (*Time-Shift* et *Duration*). <https://hal.science/hal-04621444/file/main.pdf> (figure 5 p. 8).



© Giuseppe Follacchio

Photo d'une performance de *The Cloud* à Gand, Belgique (2024).

# *The Cloud*: une œuvre instantanée

*The Cloud* propose de rendre hommage, avec une approche chorégraphique, au drame survenu lors de l'explosion du réacteur de Tchernobyl par l'intersection de deux hyperobjets<sup>1</sup> : le nuage nucléaire historique laissé par l'explosion et le nuage contemporain de l'apprentissage machine.

## AXEL CHEMLA-ROMEUSANTOS

Artiste, musicien, chercheur IA

## IGOR DOBRIČIĆ

Dramaturge

## ARKADI ZAIDES

Chorégraphe et metteur en scène,  
Institut des croisements

### Une approche documentaire de la chorégraphie

La chorégraphie documentaire, proposée par Arkadi Zaidés avec des œuvres telles qu'*Archive* (2014), *Talos* (2017) et *Necropolis* (2023), peut être résumée comme un type de travail chorégraphique intégrant des documents comme sources d'informations factuelles pour questionner et intervenir dans les réalités sociales et politiques.

Dans ce spectacle, Zaidés explore un drame auquel il est personnellement lié : la catastrophe de Tchernobyl de 1986. Après l'explosion du réacteur, environ 700 000 jeunes hommes, appelés liquidateurs, furent envoyés par l'URSS pour nettoyer les débris radioactifs des sites les plus dangereux, avec

des impacts considérables sur leur santé et leur vie. Ce spectacle rend hommage à ce sacrifice à travers une approche émotionnelle et physique de cette expérience d'horreur, en la reliant à notre anxiété contemporaine face à la guerre et à la catastrophe.

Igor Dobričić, Axel Chemla-Romeu-Santos (l'auteur), les danseurs Roger Sala Reyner et Misha Demoustier ont rejoint Zaidés pour mettre en scène l'histoire de ces hommes et l'héritage de cette catastrophe, par l'introduction d'un témoignage personnel.

En partant du concept d'hyperobjet formulé par Timothy Morton<sup>2</sup>, ce processus a abouti à mettre en scène l'intersection de deux « nuages » : le nuage radioactif de la catastrophe et un autre phénomène omniprésent, l'Intelligence artificielle (IA).

1. Un hyperobjet est un objet ou un événement dont les dimensions dans l'espace et le temps sont énormes par rapport à une vie humaine, par exemple un trou noir, la forêt amazonienne, un champ pétrolier et surtout le climat. Le terme est inventé par Timothy Morton (voir *infra*, note 2).

2. Timothy Morton, « Hyperobjets », *Multitudes*, n° 72, 2018, p. 109-116.

Les hyperobjets sont décrits par Morton comme des matérialités omniprésentes dans nos espaces physiques et mentaux, bien qu'au-delà de notre capacité de rationalisation, de perception et d'action.

Le nuage radioactif de Tchernobyl et l'intelligence artificielle contemporaine peuvent être considérés comme tels, en plus d'être des conséquences de nos propres créations. Nous reions cette anxiété au constat que l'IA contemporaine est le plus souvent orientée vers la *mimesis*, signant le retour de ce qu'on pourrait appeler un positivisme hyperréaliste.

Cette simulation alimente pourtant ce que certains appellent une « ère post-vérité<sup>3</sup> », redonnant une actualité aux discours post-structuralistes sur la porosité entre réalité et fiction. Parfois pathologisé en complotisme, ce constat remet au cœur de l'actualité la difficile construction de la véridicité personnelle et collective dans un contexte de méfiance globale envers le monde politique et journalistique, une crise traversée par l'Europe entière lors de la catastrophe de Tchernobyl.

Notre utilisation de l'IA dans ce spectacle consistait à relier cet état de fait à notre approche documentaire par l'aspect non factuel du concept de document, en utilisant des modèles génératifs non comme des outils de vérification ou d'exploitation mais pour refuser toute distinction entre faits, documents et ressentis, fusionnant ensuite ces éléments pour produire un témoignage sensible tel un rituel d'invocation et de reconstruction.

### De la *mimesis* à la *morphogenesis*

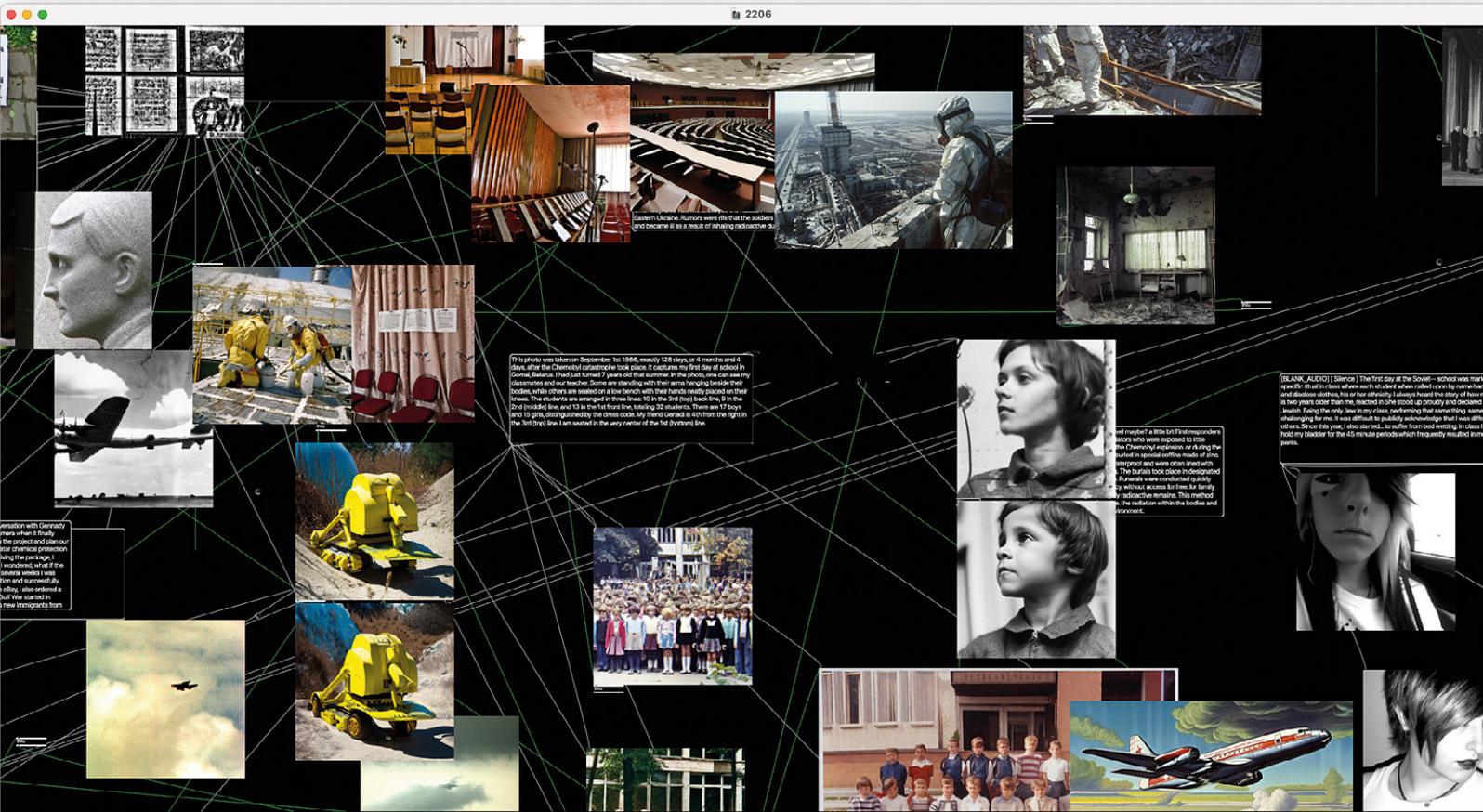
Cependant, comment trouver une voie au-delà d'une approche technocritique négative et d'un fatalisme post-humaniste positiviste, les deux aboutissant à une compréhension déficiente d'un tel cataclysme ? Pour ce faire, nous avons déplacé notre approche de l'apprentissage automatique génératif de la *mimesis* à la *morphogenesis*. Pendant la performance, l'histoire personnelle de Zaides est ainsi simultanément racontée et projetée par transcription sur une interface IA spécifique, faisant appel à des services grand public. Cet outil, rappelant les cartes de l'artiste Mark Lombardi, génère continuellement des artefacts textuels, visuels et audio, proliférant indépendamment ou manuellement par l'opérateur.

Cette généalogie générative est ancrée en utilisant des liens intermédias qui sont ensuite complexifiés ou connectés manuellement ; ces éléments voient leur contenu régénéré en utilisant leur nouveau contexte. Ce dispositif lie donc le témoignage de Zaides avec les médias générés pour perpétuellement muter l'environnement audiovisuel.

La quantité de générations croissant exponentiellement, le système s'effondre, menant pour la deuxième partie à la fusion des univers numériques et physiques à travers l'incarnation du danseur, qui performe alors sur cette fusion de contenu audiovisuel improvisé en direct (à partir de modèles entraînés sur des archives historiques de Tchernobyl) et de vidéos du nettoyage des toits de la centrale par les liquidateurs.

3. L'expression est utilisée, notamment, pour décrire l'évolution des interactions entre la politique et les médias au XXI<sup>e</sup> siècle, du fait de la montée en puissance de l'usage social d'Internet, notamment de la blogosphère et des médias sociaux.

Interface IA personnalisée pendant la prolifération.  
© Axel Chemla-Romeu-Santos



Ce processus met en avant la *materia prima* de la cybernétique: l'information. Nous pouvons comprendre des systèmes tels que ChatGPT comme des machines corrélatives imitant le langage humain, à l'instar d'une matérialisation wittgensteinienne du langage en tant que jeu formel.

Ce fonctionnement analogique est actuellement profondément lié à la construction des croyances et de la véridicité dans l'esprit humain, amplifiée par l'intrinsèque multimodalité<sup>4</sup> des signaux numériques.

Au cours du spectacle, nous poussons cette production analogique à ses limites, dévoilant l'absence de téléologie<sup>5</sup> du système. Néanmoins, les artefacts de cette hyper-interconnexion démontrent progressivement une créativité sensible, qui croît avec le nombre de matériaux et sa distance avec les documents réels. Cet acte de (dé)construction rappelle la notion d'*assemblage* de Deleuze et tend à créer un nouveau sens par recombinaison, un processus qui démontre à notre sens une certaine approche cybernétique de la poésie.

Nous avons effectué ce retour au symbolique en considérant les interactions humaines avec le système comme des opérations alchimiques sur la matière informationnelle, réalisant sept opérations différentes comme la séparation, la fermentation ou la dissolution. Ce passage de la *mimesis* à la *morphogenesis* montre donc comment ces technologies peuvent aussi être utilisées pour invoquer un « double », puis un « autre », par mutation et incarnation, perçu sur scène comme une présence démonique pouvant provoquer

inconfort (au sens de l'*Uncanny Valley* de Masahiro) mais aussi empathie, stimulée par cette situation active de co-création avec les artistes et le public.

### Une approche conative<sup>6</sup> de la vérité ?

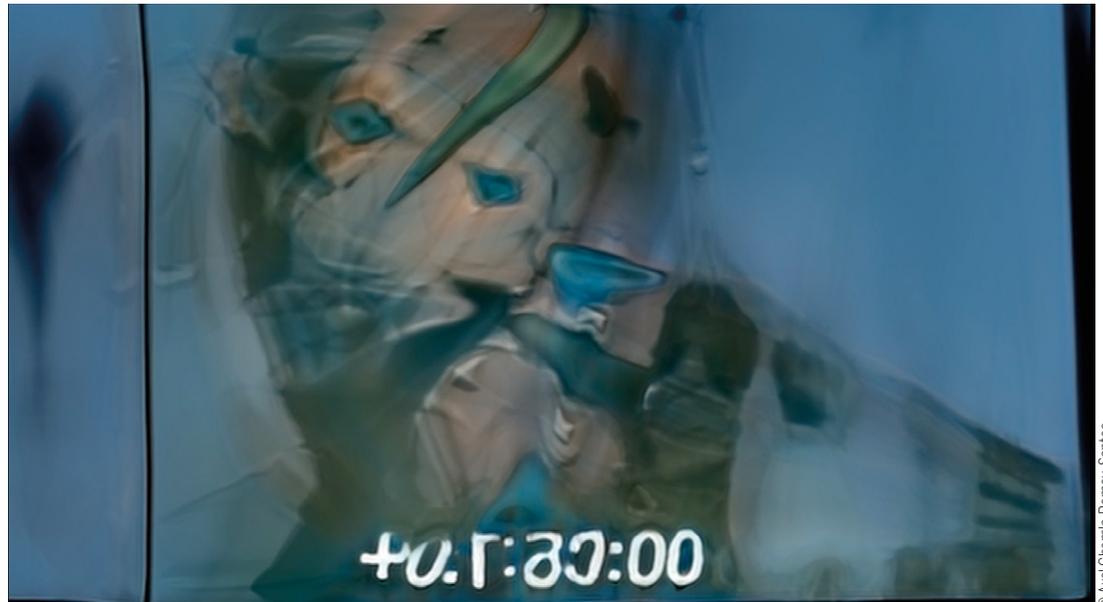
Ainsi, reconnecter cette intuition post-structuraliste avec une technologie fortement ancrée dans la rationalité est une tentative de troisième voie par une perspective post-humaine redonnant place aux croyances, à l'analogie et au symbolisme: accueillir sans distinction la réalité et la fiction à travers une fusion des deux. Cela se rapporte à la fois à l'angoisse profonde provoquée par l'appréhension écrasante de la catastrophe et à une tentative positive de développer une approche conative (dans l'effort au sens spinozien) de la réalité, reconnaissant la nécessité de reconstruire, de guérir et d'embrasser. Pour paraphraser Giorgio Agamben, bien que le *whatever* (« peu importe »), impliquant le *nothing matters* (« rien ne compte »), puisse sembler apocalyptique, cela signifie aussi *everything's worth* (« cela vaut le coup »).

*The Cloud* peut dès lors être vu comme l'instantané surréaliste d'un sentiment confus et profond d'angoisse envers ce qui nous attend. Quand aucune retraite n'est possible, quand même l'espoir est un danger parce que, tel celui des liquidateurs, le travail sans fin doit tout de même être accompli, nous apaisons cette perte par une autre déclaration: imaginons autre chose et permettons-nous de ne pas avoir peur, même dans les instants les plus défiant... ■

4. La multimodalité correspond à la présence de différents modes de transports entre deux lieux.

5. La téléologie est une doctrine qui considère le monde comme un système de rapports entre moyens et fins.

6. Notion liée à un souhait, à une intention ou à un effort de faire quelque chose.



Instantané de la vidéo finale générée par intelligence artificielle à partir de vidéos d'archives de Tchernobyl, projetée à la fin du spectacle.

© Axel Chemia-Romeu-Santos

« *The Cloud* peut dès lors être vu comme l'instantané surréaliste d'un sentiment confus et profond d'angoisse envers ce qui nous attend. »

# Interpréter, orienter, répondre.

## La mise en œuvre d'un outil conversationnel (*chatbot*) pour faciliter l'accès aux archives : l'exemple des recherches sur l'Algérie

Simplifier l'accès aux archives constitue le premier objectif du « Cadre stratégique commun de modernisation des archives » pour la période 2020-2024. Dans cette optique, le Service interministériel des Archives de France (SIAF) travaille depuis plusieurs années à faciliter l'accès aux documents d'archives conservés tant dans les administrations que dans les services publics d'archives<sup>1</sup>.

### Orienter...

Pour autant, n'a cessé de croître le besoin d'une aide à l'orientation des usagers, que ce soit pour identifier précisément les documents qui font l'objet de leur recherche ou pour localiser le lieu où ces documents sont conservés, et ce malgré la mise en ligne d'un volume croissant de ressources documentaires (guides, instruments de recherche...). En effet, la logique archivistique qui préside, le plus souvent, à la rédaction de ces outils d'orientation reste complexe à appréhender pour des usagers qui ont, par ailleurs, pris l'habitude d'être de plus en plus autonomes dans la plupart de leurs démarches administratives en ligne ou, le cas échéant, de bénéficier d'un accompagnement dédié. Ce besoin exprimé par les usagers d'une orientation et d'un accompagnement simplifiés fait écho au constat, par les services publics d'archives, d'une explosion des demandes de recherches de type administratif et des demandes par correspondance<sup>2</sup>. Fort de ce double constat, le SIAF a piloté en 2023 la mise en œuvre d'un agent conversationnel (ou *chatbot*) qui intègre une intelligence artificielle permettant d'analyser et de comprendre, de manière automatisée, une demande exprimée par un usager en langage naturel.

Baptisée NORIA pour « nouvelle orientation de recherche interactive dans les archives », la première version de ce service numérique, publiée le 27 mai 2024 sur le portail national FranceArchives<sup>3</sup> concerne les demandes d'accès aux archives produites par l'administration française en Algérie durant la période coloniale (1830-1962). Ces archives particulièrement sollicitées par les usagers, tant français qu'algériens<sup>4</sup>, présentent deux difficultés majeures : elles concernent des archives souvent disséminées dans de nombreux



Logo de l'agent conversationnel des Archives.

services d'archives français, mais également entre la France et l'Algérie, chaque pays disposant de modalités de gestion des archives qui lui sont propres, et de nombreuses demandes ne peuvent aboutir car elles portent sur des documents qui n'ont pas été produits par l'administration française, voire n'ont jamais existé, ou bien ne sont pas assez précisément libellées pour permettre leur identification. Les usagers se trouvant le plus souvent dans une démarche susceptible de créer ou de prouver un droit, il est important de pouvoir les informer de l'existence d'un document et, le cas échéant, les orienter rapidement vers l'administration qui le détient.

### ... et analyser

Les analyses conduites par les Archives nationales (AN) et les Archives nationales d'outre-mer (ANOM) ont permis d'identifier les demandes les plus fréquemment reçues et les réponses apportées.

### BASTIEN CHASTAGNER

Chef du bureau de l'accès aux archives et de l'animation du réseau, sous-direction du pilotage, de la communication et de la valorisation des archives, Service interministériel des Archives de France (SIAF), ministère de la Culture

1. La mise en ligne du service numérique @docs, au printemps 2019, a constitué, de ce point de vue, un premier outil permettant aux usagers de se repérer dans le maquis juridique du droit d'accès aux documents publics.

2. Près de 64 200 demandes pour l'année 2023 (source : enquête annuelle sur l'activité des services d'archives pour 2023).

3. <https://francearchives.gouv.fr/fr/article/848928833> (site consulté le 18 septembre 2024).

4. Elles représentent chaque année plus de 10 000 demandes dans les seuls services d'archives de rang national relevant du ministère de la Culture : Archives nationales (AN) et Archives nationales d'outre-mer (ANOM).

Page Internet NORIA sur le portail national de FranceArchives.

Page Internet NORIA sur le portail national de FranceArchives.

Ce réservoir d'informations très qualifiées constitue à la fois le point de départ des mises en parcours simplifiées, aujourd'hui intégrées dans NORIA, et la base d'entraînement de l'algorithme de l'intelligence artificielle utilisée.

Trois domaines ont été prioritairement traités : la nationalité française ; les services militaires ; la carrière professionnelle. Les parcours utilisateurs ont logiquement été développés par les experts métier sous forme d'arbres conversationnels, à partir d'une sélection représentative de cas d'usages issus des demandes instruites, par ces services, sur ces thématiques. Les retours d'une quarantaine d'utilisateurs à l'occasion d'une phase de tests sont venus améliorer cette première version désormais accessible en ligne.

Les quatre premières semaines d'utilisation de NORIA par les usagers depuis le portail national FranceArchives<sup>5</sup> permettent de tirer de premiers constats.

510 conversations<sup>6</sup> ont été enregistrées. Si ce chiffre devait se maintenir sur un an, cela porterait le nombre de conversations à 6 120, soit plus de la moitié du nombre de demandes reçues, annuellement, par les AN et les ANOM. Reste à savoir si ce volume s'ajoute aux demandes habituellement adressées à ces deux services par courrier ou par courriel, ou, *a contrario*, si une diminution progressive du volume des demandes est constatée.

Autre enseignement d'importance : il ressort de l'analyse des conversations anonymisées que les usagers adoptent, pour la plupart, les mêmes comportements de recherche que ceux qui s'observent dans les demandes adressées par courrier ou par courriel. Cela signifie donc que les arbres conversationnels déployés sont pertinents et adaptés dans les réponses qu'ils apportent, validant ainsi les cas d'usages utilisés pour construire NORIA.

### Quelle suite ?

Après cette première étape consacrée aux demandes relatives à l'Algérie, le SIAF envisage de couvrir d'autres types de demandes déjà identifiées comme massives au sein du réseau des Archives de France (demandes portant sur les décisions de justice ou sur l'urbanisme, par exemple). Dans cette perspective, il s'agira de tester une proposition construite, cette fois, sur une intelligence artificielle générative, toujours dans l'objectif de parvenir à rationaliser le flux des demandes qui parviennent dans les services d'archives, en permettant ainsi aux agents concernés de se concentrer sur celles d'entre elles qui sont les plus complexes et d'accompagner les usagers de manière plus resserrée, donc plus efficace. ■

5. Ce guichet numérique sera prochainement intégré sur les sites des AN et des ANOM et pourra, plus largement, être aisément repris sur les sites Internet des services d'archives, voire de tout service public qui le souhaitera. Son graphisme et son ergonomie ont été pensés pour permettre cette réutilisation.

6. Une conversation associe un ou *n* rebonds dans les parcours proposés.

# Les assistants intelligents vont-ils changer les habitudes de recherche des utilisateurs dans les bibliothèques?

Depuis le lancement de ChatGPT en 2022, les modèles de langage génératifs ont déclenché une révolution dans le domaine de l'intelligence artificielle. La croissance de la puissance de calcul a rendu possible l'entraînement de grands modèles de langage (LLM, *Large language models*) avec des paramètres extrêmement massifs, autrefois jugés irréalisables (ainsi, GPT-4<sup>1</sup> serait doté de mille milliards de paramètres). Parallèlement, l'augmentation de leur capacité de généralisation a élargi leur champ d'application, faisant des assistants de conversation personnalisés basés sur des LLM *open source* une option viable dans de nombreux contextes.

## Clarifions ce que vous cherchez

Le moteur de recherche de la bibliothèque numérique Gallica de la Bibliothèque nationale de France (BnF) est l'outil le plus couramment utilisé par les utilisateurs. Habituellement, les « Gallicanautes » saisissent des mots-clés dans la barre de recherche, et Gallica utilise des algorithmes pour identifier les textes contenant ces mots-clés. Parfois cependant, les utilisateurs peuvent peiner à exprimer clairement leurs intentions, ou méconnaissent les ressources disponibles. Dans ce cas, deux options s'offrent à eux : modifier les mots-clés ou utiliser l'interface de recherche avancée de Gallica<sup>2</sup>.

Néanmoins, ces deux options ne semblent pas toujours améliorer l'expérience utilisateur : l'essai de mots-clés est un processus laborieux et, selon les statistiques, moins de 5 % des « Gallicanautes » utilisent réellement la recherche avancée.

Imaginez un bibliothécaire professionnel qui connaîtrait tous les contenus de Gallica, avec lequel vous pourriez communiquer en langage naturel. Est-ce qu'un assistant conversationnel basé sur un LLM pourrait jouer ce rôle en temps réel? C'est précisément l'objectif d'une recherche post-doctorale<sup>3</sup> conduite en collaboration avec la BnF, le SCAI (Sorbonne Center for Artificial Intelligence) et l'ISIR

(Institut des systèmes intelligents et robotique) de Sorbonne Université depuis 2022 : sur la base des requêtes des utilisateurs, poser des questions de clarification pour cerner ce qu'ils ont réellement envie de trouver. Nous utilisons pour cela une technique nommée « *prompting* ». Selon les résultats obtenus au cours des derniers mois, nous avons constaté que la combinaison d'une typologie d'ambiguïtés prédéfinie et de *prompts* en mode *chain of thought*<sup>4</sup> (« chaîne de pensée ») améliore significativement la qualité des questions de clarification générées. Un dialogue à plusieurs tours, avec des questions de clarification, est ainsi produit. À partir de la requête « Guerre de cent ans », l'assistant pose d'abord une question visant à élargir le champ de recherche. Après avoir reçu la réponse de l'utilisateur, l'assistant cherche à resserrer le champ, et la réponse de l'utilisateur montre que la question posée correspond bien à son intention véritable.

## L'intelligence artificielle pourrait-elle changer vos habitudes de recherche?

Les « Gallicanautes » sont déjà habitués à combiner des mots-clés pour effectuer leurs recherches, car c'est la manière la plus efficace de communiquer avec Gallica. Ainsi, dans une certaine mesure, le moteur de recherche a modifié notre façon de poser des questions.

## JEAN-PHILIPPE MOREUX

Chef de mission IA, Bibliothèque nationale de France (BnF)

## ANFU TANG

Chercheur postdoctoral, Sorbonne Center for Artificial Intelligence (SCAI), Institut des systèmes intelligents et de robotique (ISIR), Sorbonne Université

1. Josh Achiam *et al.* (OpenAI), « GPT-4 Technical Report », *arXiv*, 2023.

2. <https://gallica.bnf.fr/services/engine/search/advancedSearch/> (site consulté le 18 septembre 2024)

3. de Laure Soulier (ISIR, Sorbonne Université), et de Vincent Guigue (AgroParisTech, Université Paris-Saclay).

4. Jason Wei *et al.*, « Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models », *arXiv*, 2022.

The screenshot shows the Gallica search interface with the following elements:

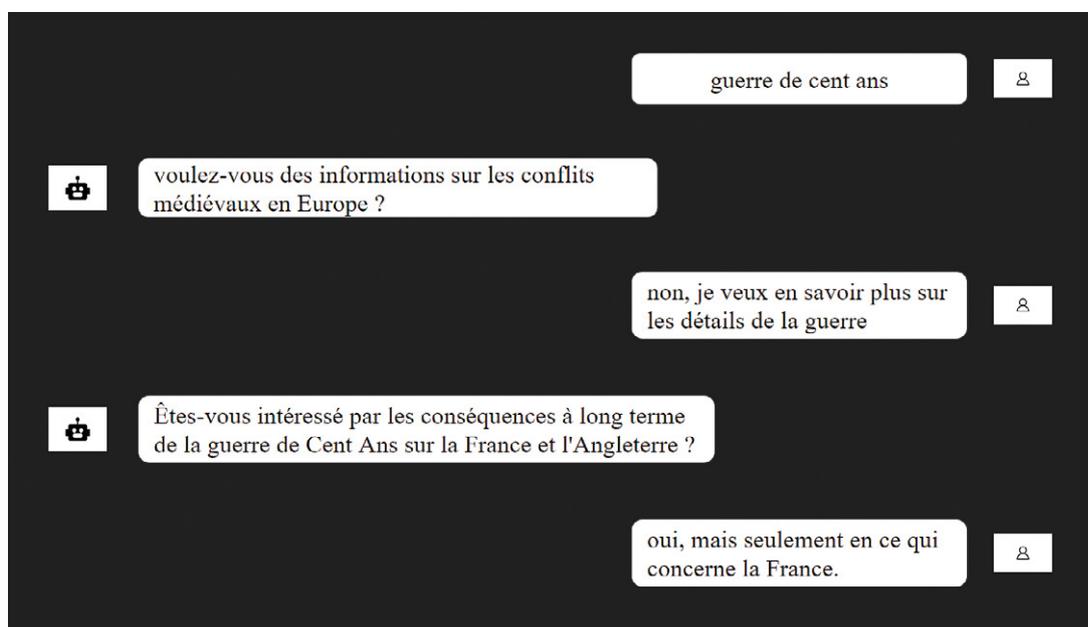
- Header:** (BnF) Gallica logo, navigation menu (TOUT GALLICA, Rechercher..., RECHERCHE AVANCÉE), and social media icons.
- Sub-headers:** TOUTES NOS SÉLECTIONS, PAR TYPES DE DOCUMENTS (highlighted), PAR THÉMATIQUES, PAR AIRES GÉOGRAPHIQUES, BLOG.
- Main Search Area:**
  - NOTICE ET TEXTE INTÉGRAL:** Input field for search scope, dropdown for 'Auteur / Contributeur', and a plus sign.
  - PAR TYPE DE DOCUMENTS:** Grid of document types: Livres, Manuscrits, Cartes, Images, Presse et revues, Enregistrements sonores, Partitions, Objets, Vidéos.
  - PAR PROXIMITÉ:** Fields for 'Je cherche le terme', 'à une distance maximale de', and 'mot(s) du terme suivant', with a plus sign.
  - PAR ANNÉE D'ÉDITION:** Fields for 'De', 'AAAA', 'à', and 'AAAA'.
- Footer:** 'Trier vos résultats par' dropdown, radio buttons for 'Regrouper par titre', 'Au volume / fascicule', and 'Recherche exacte', a 'Lancer la recherche' button, and a trash icon.

Illustration de l'interface de recherche avancée de Gallica.

Avec un assistant conversationnel basé sur un LLM, notre pratique de recherche changera-t-elle? Peut-être communiquerons-nous avec l'assistant de la même manière que nous le ferions avec une personne, par une série de questions et de réponses, ou peut-être préférons-nous laisser l'assistant conversationnel deviner nos intentions et proposer plusieurs requêtes plus détaillées en fonction de notre requête initiale? Quel mode d'interaction est le meilleur? Dans ce projet, nous allons tester ces deux approches de deux manières: la première, en utilisant les LLM pour jouer le rôle de l'utilisateur afin d'évaluer quelle méthode d'interaction améliore la performance de recherche d'information sur des jeux de données académiques; la deuxième, en organisant des ateliers avec des usagers

de Gallica pour permettre aux utilisateurs humains d'évaluer la pertinence des échanges avec l'assistant et leur perception du nouveau dispositif.

De la conversation avec des bibliothécaires à l'utilisation de moteurs de recherche, de l'emploi de mots-clés à la communication en langage naturel avec des assistants conversationnels, notre projet vise à simplifier le processus de recherche côté utilisateur afin d'améliorer l'expérience des « Gallicanutes ». Si l'intelligence artificielle peut nous aider à réaliser cet objectif, ses algorithmes se nourrissent aussi des données d'usage et de l'expérience des utilisateurs « réels ». ■



Exemple de dialogue en plusieurs tours avec questions de clarification.

# Sélectionner, épurer, décrire.

## L'apport de l'IA dans le traitement archivistique des messageries électroniques

Le programme Pèle-mél<sup>1</sup>, lauréat de l'appel à projets Services numériques innovants du ministère de la Culture en 2020, a permis de tester, sur un corpus de boîtes méls provenant du ministère de la Santé, des approches de traitement automatique de la langue naturelle reposant sur de l'extraction de termes, des relations sémantiques et des techniques d'apprentissage artificiel. L'objectif était d'explorer l'intérêt de la classification pour choisir les messageries à conserver définitivement et effectuer des tris internes, en associant, dans la démarche comme dans les résultats, l'expertise de l'archiviste. Il a donné lieu à l'élaboration de deux prototypes.

### Une question de terminologie

Le projet et ses différentes étapes ont mobilisé de la terminologie computationnelle *via* de l'étiquetage grammatical, de l'analyse morpho-syntaxique, de l'extraction de termes et d'entités nommées et l'évaluation d'un score, et se sont appuyés sur de

l'apprentissage artificiel pour la classification et la catégorisation des contenus textuels.

Les messages et leurs pièces jointes ont été dans un premier temps convertis en .txt, puis les catégories grammaticales (nom, verbe, adjectif, adverbe, déterminant, etc.), les fonctions et les phrases ont été

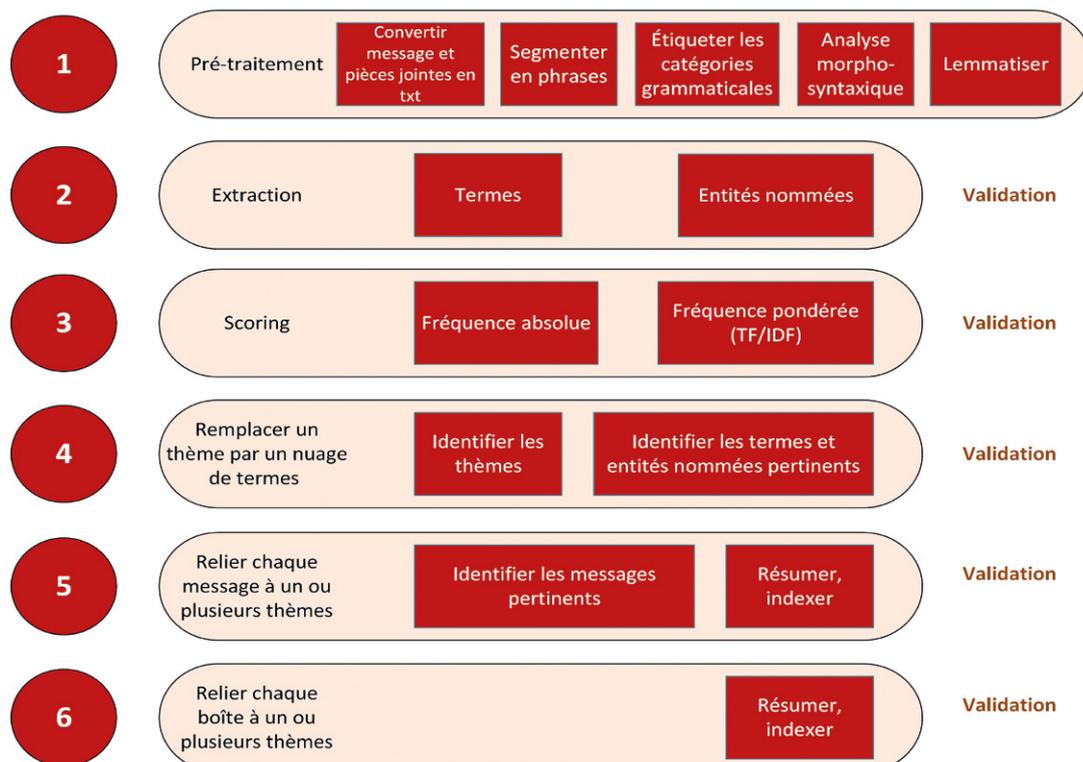
### TOURIA AÏT EL MEKKI

Maîtresse de conférences en informatique, Laboratoire d'étude et de recherche en informatique (LERIA), Université d'Angers

### BÉNÉDICTE GRAILLES

Maîtresse de conférences en archivistique, Université d'Angers, UMR CNRS 9016 Temps, mondes, société (TEMOS)

1. Porté par Bénédicte Grailles, Touria Aït el Mekki (Université d'Angers, TEMOS et LERIA), avec Chafik Akmouche, Tsanta Randriatsitohaina, Taimane Zerez. Partenaires : mission Archives des ministères sociaux (Anne Lambert, Chloé Moser) ; École nationale des chartes (Édouard Vasseur).



Phases du traitement des messageries proposé par le programme Pèle-mél (seuls les résumés automatiques n'ont pas été testés).

identifiées et l'ensemble a été lemmatisé, c'est-à-dire qu'un verbe a été réduit à son infinitif, un substantif à son singulier, un adjectif à son masculin singulier. Le score a été établi soit par la fréquence, soit, plus sûrement, par une méthode de pondération dite TF-IDF (de l'anglais *Term frequency-Inverse document frequency*) qui permet de mesurer la quantité et la qualité d'un terme dans un contenu, une méthode très utilisée en fouille de textes<sup>2</sup> pour identifier les mots-clés pertinents.

Les termes – des unités lexicales d'un ou plusieurs mots représentant un concept (par exemple, « ministère de la Culture ») – et les entités nommées – une personne, un organisme, un lieu, un événement, un sigle – ont été extraits. Pour l'analyse fine du texte, nous avons utilisé différents outils (TreeTagger, Yatea, Termsuite, Spacy) qui contiennent des algorithmes « d'apprentissage profond<sup>3</sup> » capables d'extraire des informations en utilisant l'intelligence artificielle.

Les relations sémantiques, préalables à la classification, ont ensuite été établies par une approche symbolique non supervisée, en deux temps : grâce à Word2Vec, une méthode de plongement lexical utilisant un réseau de neurones artificiels à deux couches

« L'objectif final était d'obtenir des agrégats (*clusters*) de messages incluant leur nommage et leur(s) pièce(s) jointe(s), afin de comprendre et de suivre des fils de conversation. »

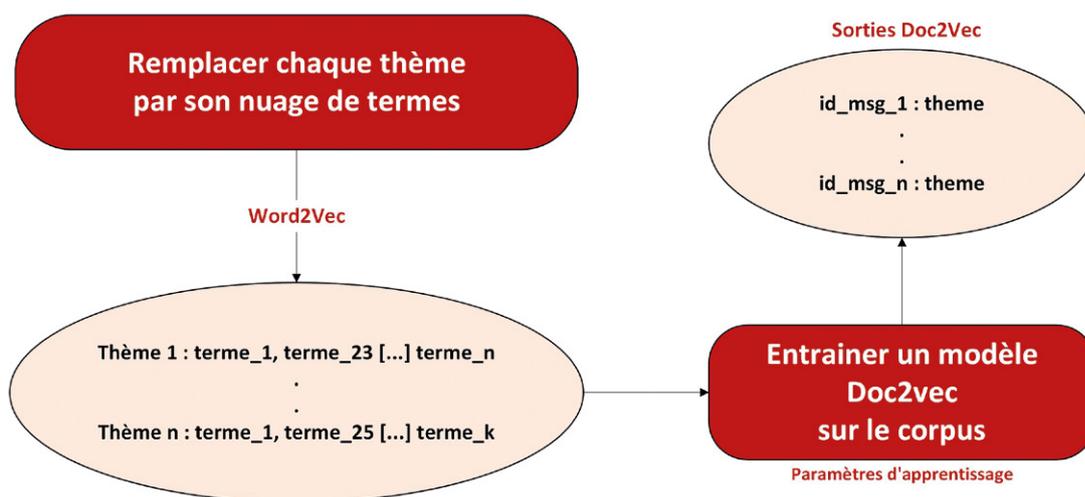
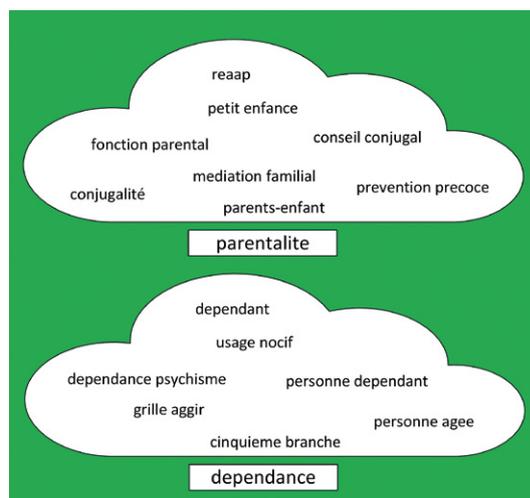
entraînées pour reconstruire le contexte linguistique des mots – les mots sont représentés en fonction de leur contexte par capture des similarités sémantiques et syntaxiques –, puis avec Doc2Vec<sup>4</sup>, une méthode prédictive de plongement de documents qui permet également de prendre en compte le contexte dans lequel un mot a été trouvé. Chaque mot *via* Word2Vec, puis chaque message *via* Doc2Vec est représenté par un vecteur de nombres réels. Les mots puis les messages utilisés dans des contextes similaires, supposés avoir des significations proches, sont représentés dans l'espace vectoriel par des vecteurs proches. L'objectif final était d'obtenir des agrégats (*clusters*) de messages incluant leur nommage et leur(s) pièce(s) jointe(s), afin de comprendre et de suivre des fils de conversation. En l'absence de corpus pré-étiquetés, un modèle générique déjà pré-entraîné sur de larges corpus en français a été utilisé. Nous avons pu ainsi relier des thèmes à leur nuage de termes et d'entités nommées puis classifier les messages en les reliant à un ou plusieurs thèmes grâce à leur nuage. La structuration a été guidée par l'archiviste qui a proposé une liste de thèmes. La même méthode pourrait être élargie à la classification de boîtes complètes au sein d'un système complexe et à l'échelle d'une organisation.

2. Voir l'article : Didier Thébaud, « Faites parler vos données ! Le *text mining* (la fouille de textes) en documentation », *Culture et Recherche*, n° 144, printemps-été 2023, p. 85-87.

3. « L'apprentissage profond » (*deep learning*) est une méthode d'intelligence artificielle qui apprend aux ordinateurs à traiter les données d'une manière inspirée du cerveau humain avec ses réseaux de neurones. Les modèles « d'apprentissage profond » peuvent ainsi reconnaître des modèles complexes dans des images, du texte, des sons et d'autres données pour produire des informations et des prévisions précises.

4. Nous avons également testé le *transformer* BERT, un modèle « d'apprentissage profond », dans sa version adaptée au français camemBERT. Pour le volume de données dont nous disposons, Doc2Vec s'est révélé plus efficace et plus rapide.

Réseaux terminologiques représentant respectivement les thèmes *parentalité* et *dépendance* établis grâce à Word2Vec par comparaison des vecteurs et sélection des vecteurs les plus proches en distance avec une profondeur de recherche de 2. Les thèmes sont proposés par l'archiviste. Les termes ont été lemmatisés. Reaap désigne un dispositif particulier : les réseaux d'écoute, d'appui et d'accompagnement des parents. La grille Aggir (Autonomie gériatologique et groupe Iso ressources) est utilisée pour évaluer la perte d'autonomie.



Méthode de classification des messages. Les messages peuvent être associés à 0, 1 ou *n* thèmes.

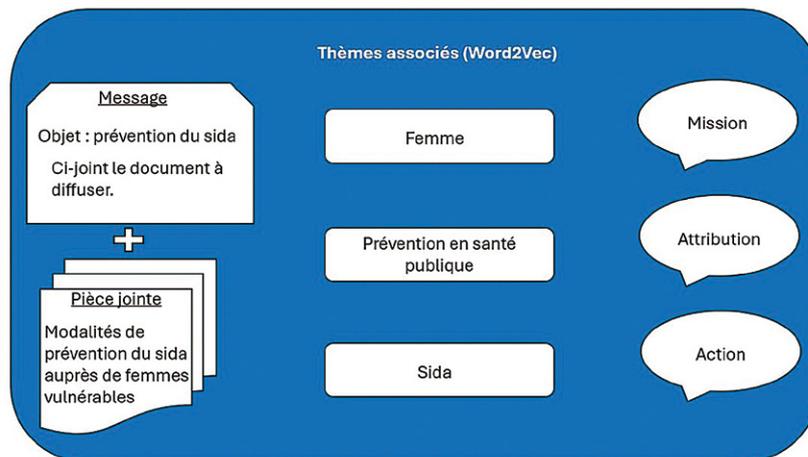
## Une compréhension fine et augmentée

Ces différentes techniques permettent d'améliorer la compréhension des messageries à l'échelle unitaire mais surtout à celle d'une organisation. Elles peuvent concourir à mieux les sélectionner, en fonction d'autres critères que la simple fonction occupée par son ou sa titulaire (approche dite *Capstone* validée par le programme Vitam<sup>5</sup>), comme par exemple la diversité des sujets de conversation, la place au sein du réseau interne, la fréquence des relations externes, son originalité ou au contraire sa représentativité. Elles peuvent aider à effectuer des tris à l'intérieur d'une boîte, entre documents privés et institutionnels, ou en repérant les messages jugés importants par le ou la titulaire de la boîte. Elles peuvent enfin contribuer à améliorer la description comme l'accès, grâce à la construction d'une ontologie et à l'identification des entités nommées contextualisant les événements et les correspondants. La génération de résumés automatiques sur un thème donné, non testée dans le projet, serait un complément intéressant.

Pour être parfaitement concluante, l'approche informatique et linguistique doit cependant être combinée avec une analyse relevant de la gestion personnelle de l'information, car les comportements restent très individualisés, et mobilisant la théorie des réseaux. Cette stratégie a été validée dans le cadre du projet CARAméls<sup>6</sup> qui a permis de détecter des profils de messagerie différents, présentant des valeurs archivistiques différenciées.

### Chacun son rôle

Si l'IA ouvre des horizons, elle ne fait que proposer des outils de compréhension et de visualisation nouveaux : l'impulsion comme la décision restent du côté du service d'archives. Dans notre démarche, nous avons sollicité l'expertise archivistique pour guider le choix des thèmes qui ont servi à la constitution des agrégats ou nuages de termes puis de messages. C'est donc bien l'archiviste qui a orienté la création de l'ontologie en s'appuyant sur ses méthodes habituelles d'analyse des flux documentaires, à savoir le triptyque missions, attributions et actions. De même, le prototype lui permet d'intervenir à presque toutes les étapes en choisissant des validations automatisées et/ou manuelles. Il n'en reste pas moins que, grâce à l'IA, il est possible d'appréhender et de catégoriser de gros



volumes avec un degré de précision inconnu jusqu'à présent. L'archiviste dispose de moyens d'exploration pour lesquels il n'est pas, pour le moment, outillé théoriquement. Par exemple, la théorie des valeurs – primaires et secondaires – se révèle insuffisante pour confirmer des choix. Concernant les réseaux de messageries, détecter des communautés différentes au sein d'une même organisation est désormais réalisable. La question devient alors de choisir des boîtes méls pertinentes pour chacune de ces communautés, soit parce qu'elles sont centrales, soit parce qu'elles articulent la circulation entre deux communautés, soit parce qu'elles sont des nœuds de transmission internes. Cette sélection ne pourra se faire qu'en fonction d'une politique d'archivage validée, en croisant les informations avec des méthodes issues des sciences sociales, et nécessitera plus de temps et d'énergie que la simple identification par fonction.

Les potentialités ouvertes par l'intelligence artificielle et plus spécifiquement par le traitement automatique de la langue sont réelles. Elles promettent un gain qualitatif évident. Mais elles ne sont rien sans une réflexion archivistique approfondie et sans une analyse des comportements des utilisateurs et utilisatrices. Si l'IA autorise des actions jusque-là inenvisageables étant donné les volumes et la complexité des échanges, elle replace l'archiviste et ses compétences métier au centre du dispositif et, paradoxalement, complexifie ses décisions en lui donnant accès à de nouvelles variables. ■

Exemple de résultat de la classification d'un message à partir des réseaux terminologiques précédemment structurés. Le message ici proposé est relié à trois thèmes différents qui correspondent à des missions, attributions et/ou actions du producteur d'archives.

5. Pour « Valeurs immatérielles transmises aux archives pour mémoire ». Ce programme interministériel français d'archivage électronique est porté par trois ministères, Europe et Affaires étrangères, Culture, Armées, tous trois responsables de la conservation des archives de l'État.

6. « Comprendre les administrateurs et leurs relations à leurs méls », financement par la communauté urbaine Angers Loire Métropole. Projet porté par Patrice Marcilloux et Bénédicte Grailles (Université d'Angers, TEMOS), avec Edgar Lejeune.

## Bibliographie

Touria Aït El Mekki, Bénédicte Grailles et Tsanta Randriatsitohaina, « Création d'une base de connaissances à partir de messageries spécialisées pour améliorer l'exploitation et l'archivage des méls », *JADT 2022 Proceedings of the 16th International Conference on statistical analysis of textual data*, Vadistat press, Editzioni Erranti, 2022, p. 52-59.

Bénédicte Grailles, Touria Aït El Mekki et Édouard Vasseur, « Improving the archiving and contextualization of electronic messaging in French », *International Conference on Digital Preservation – iPres 2022 Proceedings iPres 2022 Glasgow 12–16 September 2022*, 2022, p. 374.

Bénédicte Grailles et Touria Aït El Mekki, *Pêle-Mél. Plateforme d'exploration, de livraison et d'évaluation des méls. Rapport de recherche*, Université d'Angers – TEMOS, 2022, 64 p. (hal-04647186).

Bénédicte Grailles, *Pêle-mél. Plateforme d'exploration, de livraison et d'évaluation des méls. Rapport d'évaluation des usages*, Université d'Angers – TEMOS, 2023, 29 p. (hal-04647179).

# Et si je demandais à ChatGPT?

## Commentaires sur l'utilisation de l'IA en milieu professionnel

Faut-il utiliser ou non les systèmes d'intelligence artificielle générative?

Cette question soulève un véritable dilemme pour les agents publics...

**AURÉLIEN CONRAUX**

Administrateur ministériel des données,  
algorithmes et codes sources délégué,  
Service du numérique, ministère  
de la Culture

### Une pénétration exponentielle de l'IA dans le quotidien du travail

Depuis l'ouverture du service de ChatGPT fin 2022, qui a vulgarisé les nouvelles possibilités des systèmes d'intelligence artificielle générative pour le grand public, un courriel reçu au Service du numérique sur deux semble être une offre de prestataire sur l'IA ou une invitation à un forum dédié à l'IA.

En outre, les requêtes des services de l'administration se multiplient, d'une part, pour demander quand et selon quelles modalités le Service du numérique du ministère de la Culture va déployer des outils d'intelligence artificielle pour simplifier les tâches complexes, répétitives, et venir ainsi en appui aux agents, d'autre part, pour formuler des besoins de formation pratique sur l'IA et les données culturelles.

L'intérêt des agents Culture, même les moins technophiles, pour trouver des usages concrets est indéniable, avec le souhait additionnel et quasi systématique de mieux comprendre les enjeux juridiques, éthiques et environnementaux de l'IA générative.

Alors, en pratique, que peut nous apporter l'IA, ou plus précisément ces « grands modèles de langage<sup>1</sup> » capables de générer des enchaînements statistiquement pertinents de mots et de phrases, en réponse à une requête de produire une réponse « semblable » à ce qui a été observé dans l'énorme corpus utilisé pour l'entraînement ?

### Les IA actuelles font de bonnes synthèses... à retravailler

Si l'on « invite » ou *prompte* ChatGPT<sup>2</sup> à répondre à une question synthétique mais peu contextualisée, le résultat est assez convaincant, en quelques secondes (encadré ci-dessous).

En pratique, quelques traitements sont toujours indispensables pour avoir une réponse de qualité, ou du moins utilisable : effacement des marques ou des noms de produits cités, réordonnement des items (voire suppression des doublons), reformulation, attention aux biais apportés par un contexte

1. En anglais *large language model* ou LLM.

2. ChatGPT 4o, mai 2024. ChatGPT signifie l'association d'un *chatbot* à des capacités IA *Generative Pre-trained Transformers*, soit un assistant conversationnel permettant d'accéder sans connaissance technique aux capacités d'un modèle d'IA basé sur l'architecture de « transformeurs ».

#### Question:

« Donne-moi des exemples d'usages concrets des données pour les institutions culturelles »

#### Réponse<sup>1</sup>:

##### «1. Gestion des collections

- Catalogage et numérisation : les musées et les bibliothèques utilisent des bases de données pour cataloguer et numériser leurs collections, facilitant ainsi l'accès, la recherche et la gestion des œuvres et des documents.
- Suivi des prêts et des déplacements : les données permettent de suivre les objets prêtés à d'autres institutions, de gérer les rotations d'expositions et d'assurer la sécurité et la conservation des œuvres.

1. Liste fournie par ChatGPT 4o (compte gratuit), réarrangée et légèrement retravaillée pour une meilleure lisibilité.

#### 2. Amélioration de l'expérience des visiteurs

- Des applications mobiles et des guides interactifs utilisent des données pour offrir des visites guidées personnalisées, des informations contextuelles sur les œuvres, et des expériences enrichies par la réalité augmentée.
- Les données collectées via les billets, les capteurs de mouvement et les systèmes de suivi permettent d'analyser les parcours des visiteurs, d'optimiser les flux de circulation et de déterminer les zones les plus populaires.

#### 3. Marketing

- Les institutions culturelles utilisent les données de fréquentation, les préférences des visiteurs et les interactions en ligne pour personnaliser les campagnes de marketing et les communications, attirant ainsi un public plus large et plus diversifié.
- L'analyse des données des réseaux sociaux permet de comprendre l'engagement du public, d'évaluer les réactions aux expositions et événements, et d'ajuster les stratégies de communication.

#### 4. Recherche et conservation préventive

- Les chercheurs utilisent les données scientifiques pour étudier les matériaux et les techniques des œuvres d'art et des artefacts, aidant ainsi à leur conservation et à leur restauration.
- Les technologies basées sur les données permettent à partir d'échantillons statistiques d'évaluer l'état de conservation d'ensembles d'œuvres et de planifier des interventions préventives.

#### 5. Accessibilité et inclusion

- Les traitements de données permettent de faciliter l'accès des œuvres aux personnes handicapées, avec des descriptions audio, des sous-titres et des interfaces utilisateur adaptées.
- En utilisant les données sur les besoins et les intérêts des visiteurs, les institutions peuvent développer des programmes éducatifs adaptés à différents publics, y compris les écoles, les familles et les chercheurs.

#### 6. Offres culturelles

- Les données sur les événements passés, les tendances de fréquentation et les retours des visiteurs aident à planifier des expositions et des événements qui répondent aux attentes du public.
- Les institutions utilisent les données pour évaluer l'impact de leurs programmes et événements, mesurant des indicateurs comme la satisfaction des visiteurs, la couverture médiatique et l'engagement en ligne.

#### 7. Financements

- Les données permettent de produire des rapports détaillés sur l'utilisation des ressources, l'impact des programmes et les besoins futurs, facilitant ainsi l'obtention de subventions et le soutien des donateurs.
- Les institutions peuvent utiliser les données pour cibler les campagnes de financement participatif, en identifiant des donateurs potentiels et en personnalisant les appels aux dons.

institutionnel plutôt anglo-saxon dans le corpus d'entraînement, etc.

Pour un connaisseur du sujet, le gain de temps est appréciable, d'autant que cette reprise relève de principes simples : savoir quand utiliser des outils d'IA publics (ou à terme internalisés), quel crédit apporter aux réponses des modèles, et comment éviter tout impact négatif pour le lecteur<sup>3</sup>.

### Une « charte IA » pour partager les principes à suivre au ministère de la Culture

Pour des usages plus contextualisés (l'instruction d'un dossier spécifique à un demandeur, un site, un cas institutionnel...) ou liés à une actualité récente ou un sujet sensible, ces LLM génériques n'apportent évidemment pas le degré de précision requis et ne permettent pas d'assurer la confidentialité du travail administratif.

Pour ces cas où les outils spécialisés requis sont encore à l'état d'ébauche lente à venir, le ministère de la Culture a d'ores et déjà jugé utile de faciliter la prise de décision des agents, avec la publication d'une *Charte interne relative à l'intelligence artificielle générative*. Pour un usage responsable de l'intelligence artificielle (juin 2024). Sous forme d'un livret facilement manipulable, ce document promeut une utilisation maîtrisée de l'IA dans le cadre professionnel. Après quelques définitions établissant un vocabulaire commun, sont rappelés les avantages des technologies d'IA générative ainsi que les points d'attention à vérifier : la production potentielle d'informations inexactes, la confidentialité des informations à traiter, le respect des droits de propriété intellectuelle et des droits d'auteur, ainsi que l'impact environnemental des systèmes d'intelligence artificielle.

Plusieurs recommandations en découlent : l'utilisation des outils d'IA là où la hiérarchie le permet et où le gain d'efficacité est démontré, l'explicitation des systèmes utilisés lorsque l'IA structure une décision ou une réponse, l'abstention lorsque des outils plus précis, transparents ou économes existent, par exemple le recours à des banques d'images plutôt qu'à la génération de visuels d'illustration, etc.

### Et (à venir) des assistants IA culturels spécialisés...

L'IA en milieu professionnel culturel ne s'arrêtera heureusement pas à ChatGPT ou à ses équivalents : les systèmes d'IA spécialisés dans l'analyse de dossiers culturels juridiques, administratifs ou scientifiques, des systèmes facilitant l'indexation des œuvres culturelles comme des RAG<sup>4</sup> citant leurs sources sont déjà en construction et en tests. Avec les mêmes principes d'utilisation appliqués à une gamme d'outils spécialisés, les usages des systèmes d'IA dans le secteur culturel seront d'autant plus précis que les outils seront spécialisés (donc légers et économes) et entraînés sur une masse de données françaises et francophones, pour représenter dans ses plus fines nuances les métiers de la Culture, la pensée française et sa diversité culturelle et linguistique. ■



Façade du ministère de la Culture, octobre 2014.

© Falcon (CC-BY-SA-2.0) : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Minist%C3%A8re\\_de\\_la\\_Culture\\_\(15916335902\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Minist%C3%A8re_de_la_Culture_(15916335902).jpg)

3. Les lecteurs non familiers des contraintes juridiques et des recherches de biais dans les algorithmes publics pourront utilement se rapporter, pour une première approche, à la *Politique du ministère de la Culture pour les codes sources, algorithmes et logiciels libres* (2022) : <https://www.culture.gouv.fr/Thematiques/innovation-numerique/Publications/Politique-du-ministere-de-la-Culture-pour-les-codes-sources-algorithmes-et-logiciels-libres> (site consulté le 18 septembre 2024).

4. RAG (*retrieval augmented generation*) : système d'IA dit « de génération à enrichissement contextuel » combinant à la génération de contenu des fonctions de recherche et de citation d'informations à la fiabilité certaine (par exemple Légifrance ou les fiches de [ServicePublic.fr](https://www.servicepublic.fr)) pour améliorer significativement la pertinence et la fiabilité d'un contenu produit par une IA. Voir dans ce numéro l'article : Ulrich Tan, « L'IA générative dans l'administration : une stratégie d'innovation de l'État », p. 48.

## A retenir

Ces recommandations pour un usage responsable de l'intelligence artificielle (IA) générative sont formulées par le service du numérique du secrétariat général et s'adressent à l'ensemble des agents des services centraux, déconcentrés et à compétence nationale du ministère.

**L'usage de l'intelligence artificielle générative à des fins professionnelles sur les postes de travail du ministère est autorisé sous réserve d'une bonne compréhension des tenants et aboutissants de ces systèmes et d'une application stricte des principes d'utilisation présentés dans ce document.**

### ÊTRE CONSCIENT(E) DES PRINCIPALES LIMITES LIÉES À L'USAGE DE L'IA GÉNÉRATIVE

- L'IA générative peut produire des informations inexactes et variables selon la manière de l'interroger.
- L'utilisateur peut divulguer des données sensibles lorsqu'il interagit avec l'IA générative.
- Les sources utilisées par l'IA générative peuvent ne pas être identifiables et potentiellement violer le droit de la propriété intellectuelle.
- Les systèmes d'intelligence artificielle générative sont très consommateurs en ressources matérielles, ce qui provoque une grande consommation en électricité et en eau dans les centres de données.

### COMMENT UTILISER L'IA GÉNÉRATIVE ?

- Saisissez uniquement des informations qui peuvent être rendues publiques.
- Soyez transparent(e) et signalez l'utilisation de l'IA générative à vos lecteurs, notamment à votre hiérarchie.
- N'utilisez pas un contenu que vous pourriez légitimement suspecter de réutiliser du contenu protégé.
- Recourez de manière raisonnée et responsable à l'IA générative en ayant conscience des impacts environnementaux.
- Examinez d'un œil critique les propositions qui vous sont faites et vérifiez toujours l'exactitude des réponses.
- Soyez conscient(e) des biais : gardez à l'esprit qu'il ne s'agit que d'un outil et essayez de comprendre comment il fonctionne.

### RENONCER À L'IA GÉNÉRATIVE SI...

- Vous êtes amené(e) à saisir et donc à divulguer des données personnelles, confidentielles, protégées par le droit d'auteur ou autrement sensibles.
- Vous ne connaissez pas, ne comprenez pas ou n'acceptez pas les conditions d'utilisation des services que vous pensez utiliser.
- Vous ne pouvez pas évaluer le résultat en matière d'exactitude factuelle, de pertinence des références citées et d'impartialité du point de vue.
- Vous avez besoin d'expliquer vos résultats ou devez savoir avec précision comment votre réponse a été obtenue.
- Une autre solution moins impactante écologiquement peut répondre à votre besoin.
- Votre hiérarchie l'interdit pour certains usages.

A RETENIR

09

# L'IA générative dans l'administration : une stratégie d'innovation de l'État

L'intelligence artificielle générative est expérimentée dans les services publics depuis près d'un an. Si les premiers résultats sont encourageants et que les cas d'usage envisagés se multiplient, ils ne doivent pas faire oublier les limites de cette technologie coûteuse et loin d'être infaillible. Pour répondre aux défis de l'IA générative au sein de l'État, la Direction interministérielle du numérique (DINUM) est engagée dans une stratégie ambitieuse d'appropriation par les différents ministères et d'innovation. Elle vise à faire émerger des produits efficaces avec l'incubateur AllIAnce, tout en fournissant des briques technologiques pour répondre aux besoins des administrations avec le projet Albert.

## ULRICH TAN

Chef du DataLab du département Etalab de la Direction interministérielle du numérique (DINUM), adjoint de la directrice du département Etalab de la DINUM et rapporteur au comité sur l'intelligence artificielle générative

## Le projet

L'expérimentation de l'IA générative dans les services publics a été lancée le 5 octobre 2023 par le ministre Stanislas Guerini<sup>1</sup>. Quelques mois plus tôt, ChatGPT avait popularisé cette technologie qui permet de créer des contenus (texte, son, image...) à partir d'instructions données simplement en langage naturel. Les idées d'usage fleurissent vite, au gré de l'imaginaire des utilisateurs : faire des résumés, des traductions, des analyses...

Le premier cas d'usage testé dans l'administration a été la réponse aux avis d'usagers sur Services publics plus (SPP). L'IA propose aux agents une réponse qu'ils peuvent modifier avant de la publier. Le délai de réponse est passé de 19 à 3 jours et la satisfaction des usagers est passée de 57 % à 68 % (taux de réponses jugées utiles). Ces résultats sont encourageants, mais il faut garder à l'esprit que ce cas d'usage reste simple<sup>2</sup>. Qu'en est-il des cas plus complexes ou nécessitant de travailler sur des données confidentielles ?

Depuis un an, la DINUM a une stratégie d'IA générative visant à répondre à tout besoin de l'administration. Elle s'articule autour d'un incubateur de produits, AllIAnce<sup>3</sup>, et d'un programme technologique, Albert. Le premier réunit des administrations, mais aussi des chercheurs et des entreprises privées françaises expertes du domaine. Le second est développé par le DataLab de la DINUM et vise

une mutualisation de moyens, de savoir-faire et de solutions technologiques libres.

Plusieurs produits sont construits avec Albert. Certains sont conçus par la DINUM, comme Albert France Services (Albert FS), développé pour l'Agence nationale de la cohésion des territoires (ANCT). En expérimentation depuis janvier dans 26 France Services, il propose de répondre à des questions administratives, en citant ses sources<sup>4</sup> et avec la possibilité de discuter avec l'IA. Des déclinaisons d'Albert FS sont en développement, dont certaines sur des données confidentielles. La DINUM conçoit des produits interministériels comme Albert Tchapp, qui met à disposition l'IA générative directement dans la messagerie Tchapp. C'est une alternative souveraine à des outils comme ChatGPT, qui posent des problèmes de maîtrise des données. Par ailleurs, la DINUM encourage les administrations à reprendre ses codes sources, libres, ou à consommer son service Albert API. Elle souhaite ainsi faciliter l'appropriation de la technologie, en réduisant les barrières à l'entrée (par exemple savoir-faire algorithmique, gestion de la puissance de calcul).

Albert a été développé sur la base de briques logicielles libres. Des modèles pré-entraînés (fondationnels) ont par exemple été ajustés (*fine-tuning* et ajout de modules spécifiques) pour les besoins de l'administration<sup>5</sup> : style de formulation, acronymes, sources documentaires...

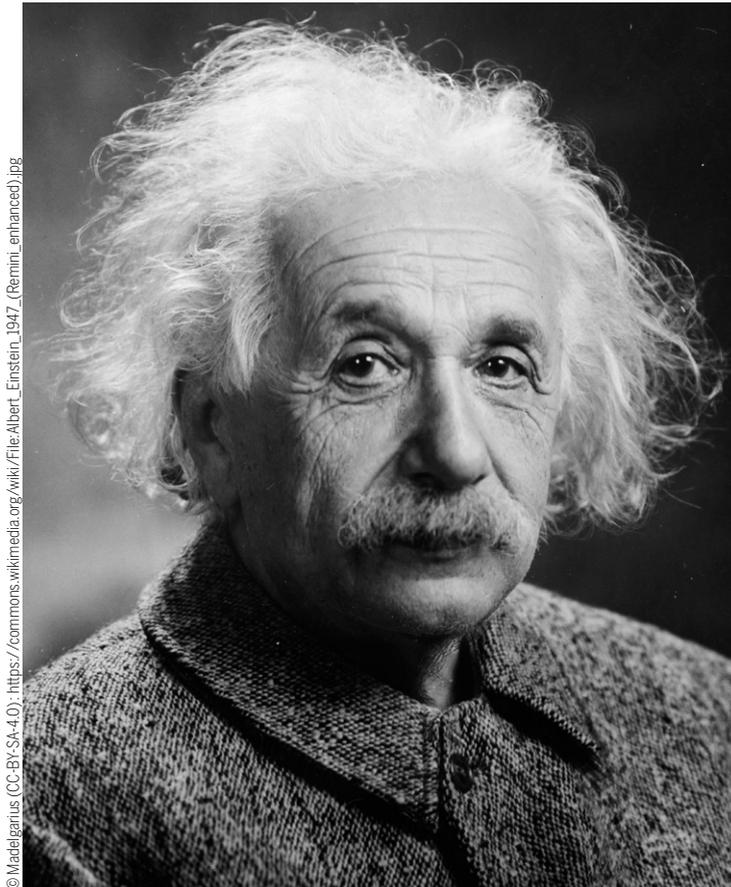
1. <https://www.transformation.gouv.fr/files/presse/cp-experimentation-intelligence-artificielle-generative-services-publics.pdf>

2. Il ne s'agit pas d'engager une discussion avec l'usager, ni même de lui proposer une solution à un problème administratif, mais simplement de formuler une réponse à un avis.

3. <https://alliance.numerique.gouv.fr/>

4. Génération augmentée par récupération documentaire, ou RAG : voir dans ce numéro l'article : Aurélien Conraux, « Et si je demandais à ChatGPT ? Commentaires sur l'utilisation de l'IA en milieu professionnel », p. 46.

5. Parmi les modèles utilisés : Llama2-13B, Mistral-7B, Llama3-8B, Mixtral-8x7B...



© Madalagarius (CC-BY-SA-4.0) : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert\\_Einstein\\_1947\\_\(Remini\\_enhanced\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_1947_(Remini_enhanced).jpg)

Portrait d'Albert Einstein, 1947. Photographie initiale d'Oren Jack Turner, Princeton, New Jersey, avec traitement de l'image par intelligence artificielle, 2022.

### Mais les IA génératives restent opaques

D'une part, les modèles libres ne sont pas toujours ouverts, car les données utilisées pour leur entraînement ne sont pas divulguées. C'est le cas des modèles libres les plus performants (par exemple Llama3, Mistral). Des incertitudes subsistent quant au respect des droits d'auteur, aux biais culturels ou sur l'utilisation de données personnelles. Des initiatives existent pour contre-carrer cet angle mort, comme l'*Alliance for language technologies-European digital infrastructure consortium* (l'ALT-EDIC LANG:IA)<sup>6</sup>, menée par le ministère de la Culture, qui s'intéresse aux jeux de données en français.

D'autre part, la transparence algorithmique ne peut être garantie aujourd'hui avec ces technologies. Il est alors préférable que l'IA générative ne soit pas impliquée dans un processus de décision administrative.

### De plus, l'IA générative commet des erreurs, voire hallucine (c'est-à-dire invente des faits)

C'est d'autant plus trompeur qu'elle le fait avec des formulations assertives. L'opposabilité d'une erreur de l'IA met l'administration en risque<sup>7</sup>. La responsabilité de la relation aux usagers doit rester entre les mains des agents. Et ceux-ci doivent être sensibilisés à la faillibilité de l'IA. Car si son utilisation est simple, son utilisation pertinente nécessite un minimum de vigilance : formation et acculturation des agents sont un passage obligé.

L'intelligence artificielle générative est une technologie prometteuse pour améliorer les services publics, à condition d'en maîtriser les limites. Ce n'est qu'alors qu'elle permettra vraiment de libérer l'intelligence humaine, par exemple en donnant plus de temps à un agent pour accompagner humainement un usager venu le voir en France Services. ■

« L'intelligence artificielle générative est une technologie prometteuse pour améliorer les services publics, à condition d'en maîtriser les limites. »

6. <https://alliance.numerique.gouv.fr/les-produits-incub%C3%A9s/languia/> Voir dans ce numéro l'article de Thibault Grouas, « Les technologies des langues : un secteur stratégique pour des IA souveraines, compétitives et respectueuses de nos langues en France et en Europe », p. 126.

7. Et le secteur privé. Voir aussi le cas « Air Canada » : <https://www.bbc.com/travel/article/20240222-air-canada-chatbot-misinformation-what-travellers-should-know>





# Conscientiser l'impact de l'IA sur les méthodes d'enseignement et de recherche

# AI4LAM: une communauté pour l'intelligence artificielle dans les bibliothèques, archives et musées



La communauté AI4LAM (*Artificial intelligence for libraries, archives and museums*) réunit des personnes issues de la sphère des archives, bibliothèques et musées et des humanités numériques, intéressées par le développement de l'intelligence artificielle dans ce secteur.

### EMMANUELLE BERMÈS

Responsable pédagogique du master Technologies numériques appliquées à l'histoire (TNAH), École des chartes. Au nom des membres du bureau du chapitre francophone d'AI4LAM : Luc Bellier, Emmanuelle Bermès, Karine Bomel, Florence Clavaud et Philippe Colomb

AI4LAM a commencé à se structurer en 2018, lors de l'organisation à Oslo d'une première conférence intitulée *Fantastic Futures* par la bibliothèque nationale de Norvège et la bibliothèque de l'Université de Stanford. À l'époque, l'enjeu était de constater la maturité des technologies d'intelligence artificielle,

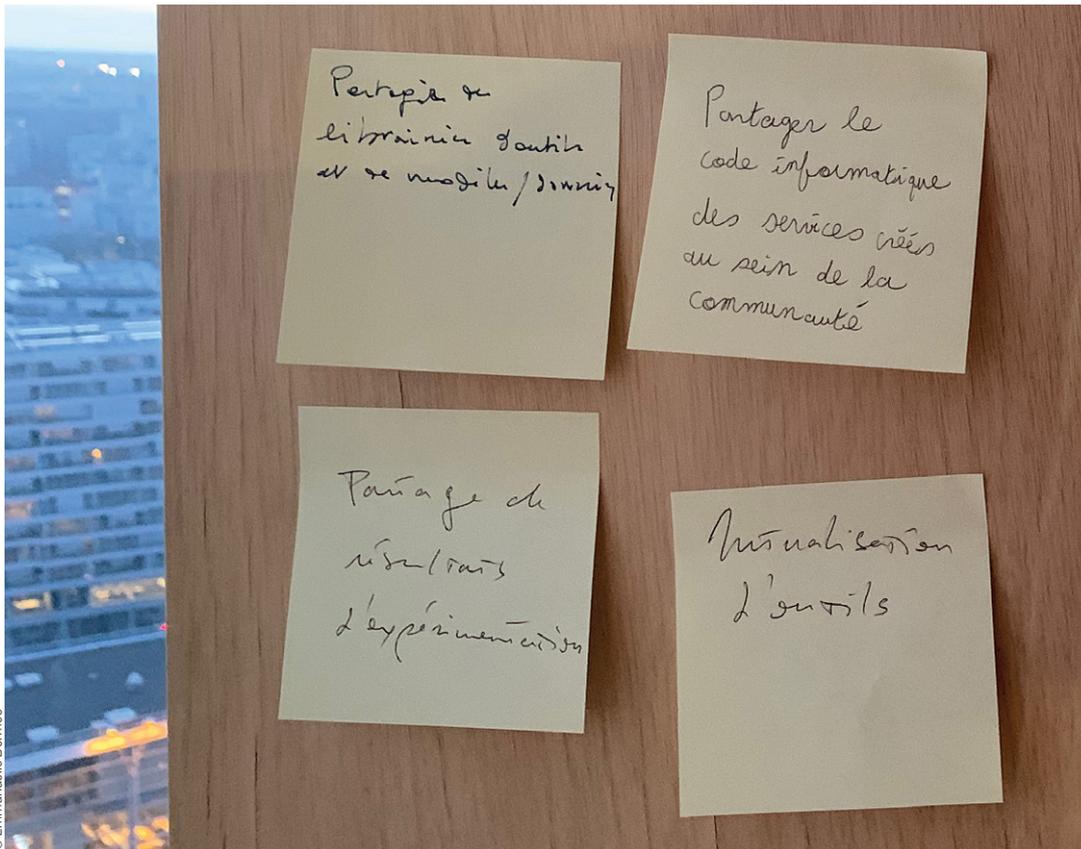
placées au cœur de leur stratégie par les industries culturelles et les GAFAM<sup>1</sup>, et de questionner leur adoption par les institutions culturelles publiques.

Devant le succès de ce premier rendez-vous, une deuxième conférence a été organisée à Stanford en 2019. La Bibliothèque nationale de France, la British

1. GAFAM pour Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft, les plus importantes entreprises américaines du secteur numérique.



La 1<sup>re</sup> réunion du chapitre francophone d'AI4LAM à la BnF en 2021.



© Emmanuelle Bermès

Post-it proposés par les participants lors de la première réunion du chapitre francophone d'AI4LAM à la BnF en 2021.

Library et la Smithsonian Institution ont alors rejoint les deux membres fondateurs pour former un secrétariat, et la communauté a commencé à se structurer en plusieurs groupes de travail et un chapitre pour la région Australie – Nouvelle-Zélande<sup>2</sup>.

Pendant cette période fondatrice, le principal enjeu était de faire connaître les possibilités offertes par ces technologies, d'organiser formations et tutoriels pour assurer la montée en compétences des professionnels du secteur, et d'encourager les expérimentations : un sentiment d'urgence animait les précurseurs, convaincus que les institutions patrimoniales devaient se doter d'une feuille de route pour prendre en compte des évolutions majeures qui s'annonçaient. Dans le même temps, il était déjà question des enjeux éthiques de l'IA et du rôle que pourraient jouer les institutions publiques pour promouvoir une approche raisonnée et transparente, basée sur la confiance et l'ouverture.

### L'émergence d'un chapitre francophone pour AI4LAM

Répondant à cet appel, la communauté francophone s'est mobilisée à son tour, à l'occasion de la troisième conférence AI4LAM qui s'est tenue à Paris en 2021 et a repris l'intitulé précédent : *Futurs fantasmatiques*. Organisée par la BnF avec le soutien de l'Université Paris Saclay, cette conférence a vu s'amorcer un tournant : plusieurs institutions passaient de l'expérimentation à l'implémentation, avec des projets d'une ampleur et d'une ambition croissantes. Nous avons ainsi vu émerger une communauté de pratique, dépassant le stade des cas d'usages et de l'information

générale pour s'aventurer sur le terrain du partage d'expertise.

La conférence de 2021 a fourni l'occasion de réunir les acteurs francophones intéressés au cours d'un atelier et d'envisager la création d'un chapitre dédié. En l'occurrence, il s'agissait de contribuer à étendre et à consolider les principes de la communauté AI4LAM en s'intéressant aux enjeux spécifiques de la communauté francophone.

L'année 2022 a vu se structurer le nouveau chapitre francophone, avec l'élection d'un bureau, la rédaction d'une charte, la mise en place d'un forum, l'organisation de plusieurs réunions et la création de groupes de travail. Ont notamment été entrepris le recensement de projets francophones (en particulier dans le domaine de la *handwritten text recognition* [HTR] ou reconnaissance d'écriture manuscrite), de ressources disponibles et de formations, avec pour objectifs de faciliter la mise en commun des documents et outils produits par la communauté, l'information des collègues en langue française et la connaissance partagée des projets en cours.

Le chapitre a pour objectif de faciliter l'intégration des membres francophones au sein de la communauté internationale en levant l'obstacle linguistique que peut représenter un usage systématique de l'anglais et en veillant à la prise en considération des spécificités de l'espace culturel francophone, notamment en matière de droit d'auteur et de pratiques professionnelles. Pour cela, il se veut un lieu d'échange et de partage à des échelles régionales, permettant de mieux connaître les initiatives et résultats (données d'entraînement, modèles, IA, données produites) dans

2. Au sein d'AI4LAM, les chapitres représentent des sous-ensembles de la communauté partageant une perspective particulière.

un espace géographique et linguistique de proximité. Par exemple, dans les services d'archives français, on retrouve des catégories d'archives similaires, issus des mêmes types d'activités; elles sont globalement traitées de la même manière et sont consultées par des usagers ayant les mêmes profils ou besoins; ce qui a été produit par l'une de ces institutions a donc des chances d'être utile à une autre.

La création d'un répertoire de projets et de jeux de données au sein d'AI4LAM a été, de ce point de vue, une source d'inspiration. Une coordination accrue des initiatives, grâce au rapprochement d'idées éparses, peut contribuer à faciliter les partenariats, mieux mutualiser les moyens, les environnements, les compétences. Cette logique ne se limite d'ailleurs pas aux projets, mais concerne également les domaines de la formation, du financement, de la veille et de la méthodologie de gestion de projet.

### Une communauté active et ouverte

Aujourd'hui, la communauté internationale AI4LAM se réunit chaque mois autour d'un webinaire pour des présentations de projets, des échanges, des partages d'expérience. Le chapitre francophone organise également régulièrement des sessions en ligne, avec des présentations de projets tels que l'enrichissement automatique des catalogues de bibliothèques, les agents conversationnels, les grands modèles de langue, dont on peut retrouver les enregistrements et supports en ligne dans l'espace de travail de la communauté. Ces réunions sont ouvertes à toutes et à tous. Des événements en présentiel sont aussi organisés, tels que les conférences annuelles *Fantastic Futures* (celle de 2024 est prévue en octobre à Canberra, Australie) et des rencontres plus locales, comme celle qui s'est tenue à la Bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg le 3 juin 2024.

Depuis fin 2022 et l'ouverture au public de ChatGPT, l'IA est devenue un sujet d'actualité de premier plan, et la prise de conscience de son impact direct et immédiat sur nos métiers s'est élargie. Dans ce contexte, AI4LAM a vocation à jouer le rôle d'un partage d'expertise, mais aussi à s'ouvrir à toutes les personnes désireuses d'en savoir plus, de comprendre quel peut être l'intérêt de ces technologies pour les bibliothèques, les archives et les musées, et éventuellement d'imaginer leurs propres projets.

N'hésitez pas à nous rejoindre!

Toute personne physique intéressée peut devenir membre du chapitre, ainsi que toute organisation publique ou privée. Il suffit pour cela, après avoir pris connaissance de la charte, de s'inscrire au groupe de discussion librement accessible en ligne. Pour retrouver toutes les ressources, événements, documents et canaux de diffusion de la communauté AI4LAM et du chapitre francophone, une seule adresse: <http://ai4lam.org>! ■



Atelier au DataLab de la BNU de Strasbourg lors de la rencontre régionale Grand Est du chapitre francophone AI4LAM, le 3 juin 2024.

# eScriptorium et l'IA pour la transcription automatique

Au cours des vingt dernières années, un effort continu de numérisation des documents historiques a conduit à la production d'une masse importante d'images numériques. Toutefois, le contenu de ces images est longtemps resté difficilement accessible. Aujourd'hui, grâce à l'intelligence artificielle, il est possible d'extraire le contenu textuel de ces documents, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la recherche.

## Une question de données

Des centaines de millions de documents historiques ont été ainsi numérisés (livres, manuscrits anciens, journaux, documents d'archives, inscriptions épigraphiques). Pour traiter cette vaste quantité de données, il est essentiel de disposer d'outils adaptés. Le logiciel eScriptorium<sup>1</sup> utilise l'intelligence artificielle pour transcrire le contenu textuel de ces documents<sup>2</sup>. Cela permet de convertir les images en textes numériques, que nous pouvons ensuite partager, publier en ligne ou dans des livres. De plus, nous pouvons appliquer des analyses avancées d'IA pour étudier la langue, le style d'écriture, et bien plus encore.

Cette entreprise se heurte à des défis importants. L'entraînement de modèles d'IA nécessite d'employer des jeux de données très vastes. Or ce volume de données est rarement disponible pour les écritures historiques. De plus, les données existantes peuvent appartenir à des entreprises, impliquant une dépendance financière (et potentiellement politique). La plupart des travaux commerciaux sont également fortement biaisés en faveur de l'écriture moderne, en particulier de l'anglais contemporain, rendant ces outils souvent inadaptés à d'autres langues ou écritures. Il est également crucial que les données que nous produisons puissent être utilisées pour former des IA

## MARC BUI

Directeur d'études cumulant, UMR CNRS 8546 Archéologie & Philologie d'Orient et d'Occident (AOROC), École pratique des hautes études (EPHE) – Université Paris Sciences et Lettres (PSL), Professeur des universités, Université Paris 8

## COLIN BRISSON

Doctorant, UMR CNRS 8155 Centre de recherche sur les civilisations de l'Asie orientale (CRCAO), EPHE – PSL

## ALIX CHAGÜE

Doctorante en humanités numériques, *Automatic Language Modelling and Analysis & Computational Humanities* (ALMANACH), Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (INRIA)/Université de Montréal/EPHE – PSL

## FRÉDÉRIC CONSTANT

Professeur des universités, CRCAO, Université Côte d'Azur

## PETER STOKES

Référent pour eScriptorium et chef du projet eScriptorium, directeur d'études, UMR CNRS 8546 AOROC, EPHE – PSL

## DANIEL STÖKL BEN EZRA

Référent pour eScriptorium et chef du projet eScriptorium, directeur d'études, AOROC, EPHE – PSL

N° DU RÉPE	DATE DES ACTES	NATURE ET ESPÈCE DES ACTES EN MI	NOMS, PRÉNOMS ET DOMICILES DES PAR INDICATIONS, SITUATIONS	RELATION DE L'Enregistrement DA DROITS
66	16	Etat liqui	An 1901, mois de juillet Vincent ( de la SS'on de Bonne Elisa Mori et en 2 <sup>es</sup> nocces de Charles Benoît Auguste), déc	18 3,7
662	16	Procès v <sup>o</sup> al d	Vincent (et d'approbatio Desains (par Louise Marthe) rue d'Assas 78, p	18 11,25
663	16	Procuration	Jung (et pièces conc <sup>o</sup> Jacques) à Estinger (Als	18 25,43
664	16	Procuration	Gombault de Razac (par Régine Jeanne Elisa Marie Jacques Tristan Nédér	18 3,75
666	16	Etat liqui (suite du 15 de repr	Feracci (de Marie cézarine Ecclivet, v <sup>o</sup> e en 1 <sup>er</sup> res et épouse de 2 <sup>es</sup> nocces de Marc-Feracci (et d'approbatio	23 481,5
667	1	Procès v <sup>o</sup> a	Bérard (par George Léopold arthur Edouard) à Par	23 7,50
668	16	(S <sup>te</sup> du 1 Décharge	Déville (par Paul dit Ernest) à Los Angel (Californie) à la	23 3,7
66	16	(d <sup>o</sup> ) d <sup>o</sup>	Cormet (par Eugène) à Paris, rue Le Pelet	18 3,75
670	17	Procuration	Son épouse, p <sup>re</sup> retrait d	18 3,75
67	17	consenteme	Rouquier (par Marie Louise Calot épouse de Je p <sup>re</sup> Besolles 109, au mariage d	18 3,75
672	17	Procuration	Quesnel ( par Jean Albert Félix) à Paris, rue des Je	18 3,75
673	17	Cession de	Henriette Louise Pergod, épouse de Lucien Médon	23 111,2
674	18	Notorité	Pierre Alphonse) à Madeleine Charr	23 3,75
675	19	Procuration	Sorel (après décès de Danielle) dite Denise Perlet	23 3,75
676	19	Notification	Picart (par Salomon dit Emile) à Nancy, faubour p <sup>re</sup> recouill	23 3,75
677	19	(S <sup>te</sup> du 24 ju	Grasser (à Laurent) et Louise Claudine	22 9,30
678	1	Realisation de	Montmartre 60, par Léon leur fils, d <sup>re</sup> à S <sup>te</sup> Gill	23 400,7
678	1	(S <sup>te</sup> du 24 ju	Teil (par le Crédit foncier) au profit de	23 3,75
679	19	d <sup>o</sup>	De Valois (par Marie Antoinette Godard, Ve	23 3,7
			Hoche 21, à la SS'	
			De Valois (par Hélène Jubert, Veuve de Jean Napst	22 3,7

Exemple d'une page de registre segmentée et transcrite grâce à eScriptorium dans le cadre du projet LECTAUREP. Chaque ligne est associée à une colonne, ce qui permet à des traitements ultérieurs de recomposer les unités logiques sur la page (FRAN\_0025\_0149\_L-0; AN MC/RE/XXIII/37).

- <https://escriptorium.readthedocs.io/> (site consulté le 18 septembre 2024).
- Ariane Pinche et Peter A. Stokes (dir.), « Documents historiques et reconnaissance automatique de textes », *Journal of Data Mining and Digital Humanities*, numéro spécial, 2023-2024. <https://jdmhd.episciences.org/page/documents-historiques-et-reconnaissance-automatique-de-textes> (site consulté le 18 septembre 2024).



La transcription d'une ligne en vieux français dans eScriptorium [BnF Arsenal MS 3350, grâce au projet HTRomance – <https://github.com/HTRomance-Project/medieval-french>].

futures, afin d'éviter la propagation de ces biais. Pour cette raison, eScriptorium est développé selon une politique de logiciel libre, gratuit et ouvert, favorisant les sciences ouvertes et les données ouvertes.

### Le logiciel eScriptorium

Le logiciel eScriptorium est développé principalement par une équipe d'AOROC (Archéologie & Philologie d'Orient et d'Occident, UMR 8546) à l'École pratique des hautes études – Université Paris Sciences et Lettres, avec des contributions importantes d'autres institutions, telles que l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (INRIA), l'École nationale des chartes – Université Paris Sciences et Lettres et l'Université de Maryland, entre autres.

Le logiciel se compose de deux parties : un « moteur d'IA » (Kraken<sup>3</sup>) et une application web ergonomique (eScriptorium). Kraken est développé par Benjamin Kiessling au sein de l'équipe de l'EPHE et est disponible librement. Il peut être utilisé seul pour des traitements à grande échelle, par les bibliothèques par exemple. eScriptorium fournit une interface graphique permettant plus d'interactions et facilitant la préparation des données et le contrôle du résultat des traitements automatiques. L'application pourrait être branchée à un autre moteur d'IA si nécessaire.

Kraken/eScriptorium couvre toutes les étapes de la transcription automatique : le chargement des images ; la détection de l'emplacement du texte et de la mise en page (appelée segmentation), qui permet de distinguer par exemple les notes marginales du texte principal ; et la transcription à proprement parler, où chaque ligne de texte identifiée durant la segmentation est interprétée pour produire un texte numérique. Le résultat de tous ces traitements peut être exporté vers des formats standards, à partir desquels on peut construire une publication ou réaliser des analyses

plus approfondies à grande échelle<sup>4</sup>. L'application permet d'entraîner des « modèles » pour Kraken, ces modèles sont ce qui permet au moteur d'IA de traiter les images de la manière attendue. Ils peuvent aussi être exportés et partagés<sup>5</sup> : c'est un aspect fondamental dans la politique d'ouverture d'eScriptorium, car les logiciels similaires ne permettent généralement pas cet export alors qu'il contribue de manière significative à limiter la dépendance à l'égard des systèmes fermés et à réduire les coûts, énergétiques notamment, liés à l'apprentissage automatique.

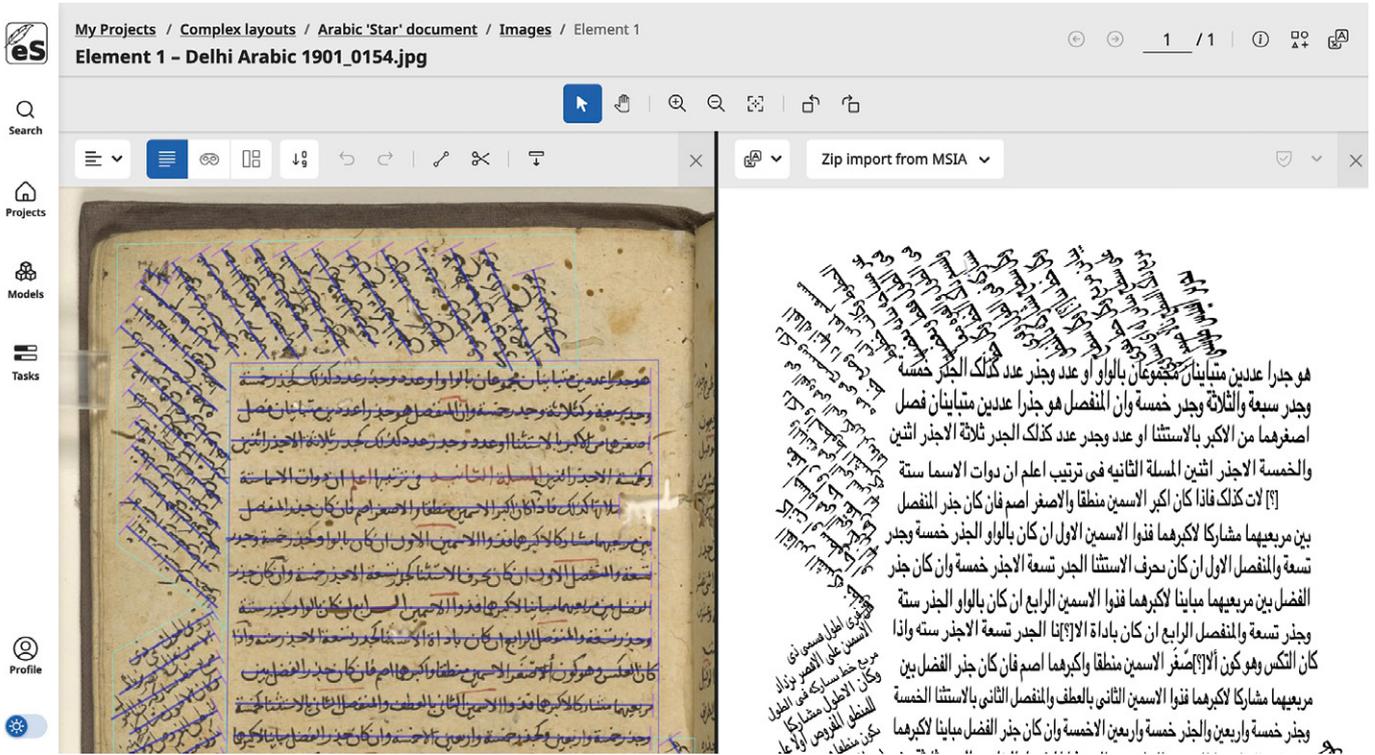
Un autre défi consiste à décider comment nous voulons que l'ordinateur transcrive. Si un scribe a abrégé un mot, voulons-nous que l'ordinateur transcrive la forme abrégée ou la forme complète (ou les deux) ? Dans quelle mesure devons-nous essayer de reproduire la forme des lettres, par exemple en préservant la distinction entre le s long (f) et le s rond (s) ? Ces questions (et bien d'autres) deviennent encore plus difficiles si l'on considère l'ensemble des différents systèmes d'écriture et des différentes pratiques savantes. Du point de vue de l'ordinateur, cela n'a pas d'importance puisqu'il fera ce que nous lui apprenons. Néanmoins, si nous voulons être efficaces et partager nos données, nous devons nous mettre d'accord sur une norme. C'est pourquoi divers groupes d'experts travaillent ensemble pour proposer des normes de segmentation et de transcription dans leurs différents domaines.

Enfin, l'application eScriptorium est compatible aussi bien avec une installation locale sur une machine personnelle qu'avec une installation sur serveur à haute puissance. À cela s'ajoutent des fonctionnalités facilitant le travail collaboratif (partages entre utilisateurs) et prenant en compte la diversité des documents traités, grâce, par exemple, à une grande souplesse vis-à-vis des sens de lecture.

3. <https://kraken.re/> (site consulté le 18 septembre 2024).

4. Pour le partage des jeux de données, voir HTR United : <https://htr-united.github.io/> (site consulté le 18 septembre 2024).

5. [https://zenodo.org/communities/ocr\\_models/](https://zenodo.org/communities/ocr_models/) (site consulté le 18 septembre 2024).



Exemple d'une page complexe en arabe segmentée et transcrite grâce à eScriptorium. L'orientation variée des lignes est un véritable défi pour l'ingénierie.

### Cas d'études

Une vingtaine d'institutions différentes disposent aujourd'hui d'instances fonctionnelles d'eScriptorium, allant de petits systèmes pour un seul chercheur ou un seul projet à de très grandes instances pour de nombreux utilisateurs. Les chercheurs ont développé des modèles entraînés pour une grande variété de langues et d'écritures, notamment le latin, le français médiéval, le vieil anglais, le grec ancien (livres manuscrits et papyrus), l'hébreu, l'arabe, le cyrillique, le glagolitique, le chinois, le japonais et le vietnamien, pour n'en citer que quelques-unes. Nous ne présentons ici que trois exemples.

LECTAUREP<sup>6</sup> est un projet exploratoire, conduit par les Archives nationales et INRIA Paris (2018-2021), qui a très tôt adopté eScriptorium pour transcrire les registres des notaires parisiens. Ces registres représentent des millions d'images et des centaines d'écritures différentes. Cette diversité posait une vraie difficulté car il n'existait alors pas de modèles de transcription capable de les traiter: LECTAUREP a contribué à produire les données permettant depuis d'entraîner de tels modèles génériques pour le français moderne et contemporain. En outre, les registres sont établis en tableaux, ce qui a posé un gros défi pour la détection de la mise en page et a montré l'importance de pouvoir entraîner des modèles de segmentation sur mesure. La transcription automatique a permis d'imaginer à terme rendre ces registres complètement requêtables par les utilisateurs de la Salle des inventaires virtuelle des Archives nationales.

Le projet Read Chinese<sup>7</sup> vise à créer des modèles d'IA pour la transcription des documents historiques chinois. Le grand nombre de caractères qu'il est nécessaire de transcrire, au moins 15 000, implique l'emploi d'un vaste jeu de données combinant diversité de contenu, de styles d'écriture et de formats de

documents. Ces outils seront également bénéfiques pour le développement de modèles<sup>8</sup> spécifiques au japonais, au coréen et au vietnamien. Plusieurs laboratoires de recherche<sup>9</sup> se sont associés à partir de 2021 pour développer de tels outils, en partenariat notamment avec la Bibliothèque nationale de France (BnF). Les modèles obtenus seront rendus publics pour la recherche. Les travaux réalisés ont déjà conduit à la publication de modèles – entraînés *via* l'écosystème eScriptorium/Kraken – capables de transcrire imprimés et manuscrits peu cursifs avec une précision supérieure à 99 %.

D'autres projets, tels que MIDRASH<sup>10</sup>, utilisent également la transcription automatique pour diverses raisons, notamment pour la paléographie (l'étude de l'écriture manuscrite historique). Par exemple, dans certains cas, le texte d'un manuscrit est déjà connu. Une transcription automatique par eScriptorium donne les coordonnées de chaque lettre sur l'image. Cela permet d'extraire facilement toutes les images d'une lettre donnée ou d'un autre symbole dans un document, pour ensuite les utiliser pour étudier les différents types d'écriture, l'utilisation de différents symboles (par exemple pour l'abréviation ou la ponctuation), la façon dont la forme d'une lettre change en fonction de la date et du lieu d'écriture, etc.

Aujourd'hui, nous avons un réseau de chercheurs qui utilisent eScriptorium et partagent leur matériel selon les principes de l'*open data* (« données ouvertes ») et de l'*open science* (« science ouverte »). Grâce à cette collaboration, l'IA devient rapidement plus efficace et nous commençons à pouvoir analyser une énorme quantité de documents historiques. Bien sûr, cela ne remplace pas la lecture détaillée, mais cela nous permet de poser des questions entièrement nouvelles et d'acquérir des connaissances sur notre patrimoine culturel qui étaient impossibles il y a seulement quelques années. ■



Exemple de la transcription automatique d'une ligne en chinois de haut en bas.

- 6. <https://lectaurep.hypotheses.org/> (site consulté le 18 septembre 2024).
- 7. <https://www.bnf.fr/fr/le> (site consulté le 18 septembre 2024).
- 8. [https://github.com/colibrissn/CHAT\\_models](https://github.com/colibrissn/CHAT_models) (site consulté le 18 septembre 2024).
- 9. AOROC (UMR 8546), CRCAO (UMR 8155), CCJ (UMR 8173 Chine, Corée, Japon) et l'IAO (Institut d'Asie orientale, UMR 5062).
- 10. <https://cordis.europa.eu/project/id/101071829/>

# L'intelligence artificielle au service du traitement des archives : l'exemple du projet SIMARA

C'est à partir de 2015 que les technologies de l'intelligence artificielle ont commencé à être explorées aux Archives nationales. D'abord exploitées à titre expérimental, elles ont fini par intégrer le processus de travail des archivistes.

## JEAN-FRANÇOIS MOUFFLET

Conservateur en chef du patrimoine, responsable de fonds aux Archives nationales (AN)

### De quelles technologies parle-t-on ?

L'intelligence artificielle est un vaste domaine. Il faut préciser en premier lieu que les technologies présentées ici relèvent du champ de l'apprentissage machine (*machine learning*) : une intelligence artificielle, afin de réaliser certaines tâches, a été entraînée en amont à partir de jeux de données.

La reconnaissance automatique des écritures manuscrites (ou *Handwritten text recognition* – HTR) est au cœur de l'ensemble des réalisations<sup>1</sup>. Elle consiste, tout comme la reconnaissance optique des caractères pour les imprimés, à faire transcrire par ordinateur des documents d'archives manuscrits et à convertir un document numérisé en mode

1. Voir Édouard Bouyé, « "Lettres en Lumières" : l'intelligence artificielle appliquée aux décrets des États de Bourgogne », *Culture et Recherche*, n° 144, printemps-été 2023, p. 110-112.

**Himanis Chancery** Prix technology offered by *tranScriptorium*

Valentina

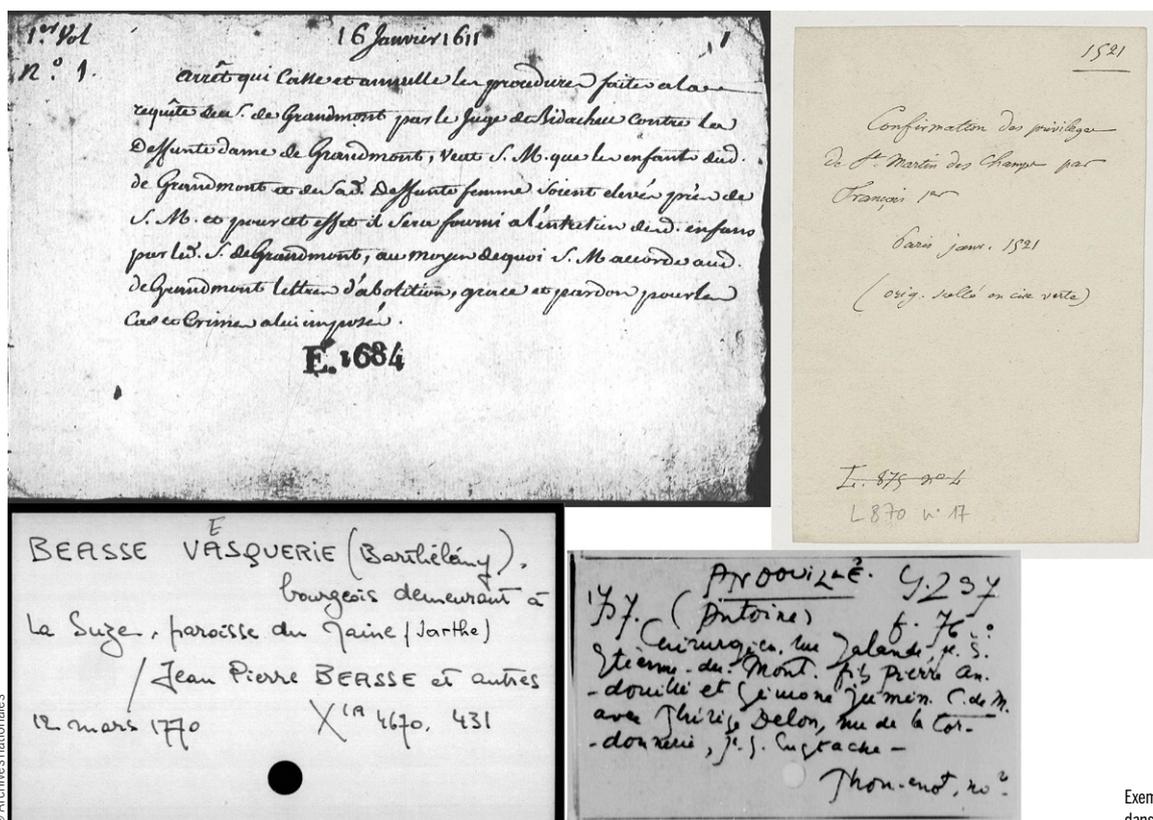
Confidence: 25  Max. results:

You are here: [HOME](#) » [chancery](#) » [JJ145](#) » [page 405](#)

1 match found for "valentina" with a confidence of 54.8% !

[← PrevMatch](#) | [← Previous](#) | [Next](#) | [NextMatch →](#)

Exemple de recherche en texte intégral dans un registre médiéval transcrit par HTR. Projet HIMANIS.



Exemples d'inventaires anciens traités dans SIMARA.

image en texte numérique totalement exploitable par l'informatique. Le défi est important compte tenu de la variabilité de l'écriture humaine à travers les siècles. Mais la technologie est devenue suffisamment mature et le support matériel suffisamment performant pour pouvoir désormais transcrire des documents du Moyen Âge avec les projets HIMANIS<sup>2</sup> et e-NDP<sup>3</sup>, ou du XIX<sup>e</sup> siècle grâce au projet LECTAUREP<sup>4</sup>. Le grand mérite de ces réalisations est d'avoir replacé les archives au cœur de la recherche historique : une fois le texte transcrit, il est possible de mener des études statistiques afin de mieux cerner les phénomènes historiques<sup>5</sup>. Les usagers bénéficient quant à eux d'un accès inédit aux documents grâce à un moteur de recherche en texte intégral. C'est un avantage considérable de pouvoir fouiller directement dans des registres médiévaux dont le contenu n'a jamais été inventorié ou indexé.

Il faut également évoquer un autre procédé : la reconnaissance d'entités nommées (ou NER – *Named entities recognition*) qui consiste, dans un texte non qualifié, à retrouver des entités de type lieu ou personnes, mais aussi tout ce qui peut se rattacher à un vocabulaire contrôlé. Le Lab des Archives nationales a ainsi développé avec l'INRIA un modèle de langage permettant de reconnaître, au sein d'inventaires d'archives non indexés, de telles entités<sup>6</sup>.

### SIMARA et le traitement des fonds d'archives anciens

Le projet SIMARA se concentre quant à lui non pas sur les documents d'archives, mais sur leurs inventaires qui sont la clé d'accès au trésor archivistique : ils rassemblent les éléments d'identification qui permettent aux chercheurs de trouver les documents qui les intéressent.

Aujourd'hui, les inventaires sont produits directement sous forme numérique, à travers le format métier international XML EAD (*Encoded archival description*) qui structure les métadonnées descriptives des archives (cote, intitulé, dates, description matérielle, analyse, etc.). Ils sont ensuite publiés dans la Salle de lecture virtuelle des Archives nationales<sup>7</sup>.

Le département du Moyen Âge et de l'Ancien Régime des Archives nationales s'est quant à lui heurté

2. HIMANIS (2015-2017) : *Historical manuscripts indexing for user-controlled search*. Ce projet, piloté par l'Institut de recherche et d'histoire des textes (IRHT), a permis de transcrire 199 registres produits par la chancellerie royale française, de 1204 à 1483. Ils sont interrogeables en texte intégral : <http://himanis.huma-num.fr/app/>. Carnet de recherche : <https://himanis.hypotheses.org/> (sites consultés le 22 juillet 2024). Pour en savoir plus, voir Dominique Stutzmann, Jean-François Moufflet et Sébastien Hamel, « La recherche en plein texte dans les sources manuscrites médiévales : enjeux et perspectives du projet HIMANIS pour l'édition électronique », *Médiévales* [en ligne], n° 73, automne 2017, mis en ligne le 15 décembre 2019, site consulté le 22 juillet 2024, <http://journals.openedition.org/medievales/8198> ; <https://doi.org/10.4000/medievales.8198>

3. e-NDP (2021-2024) : e-Notre-Dame de Paris. Ce projet a été réalisé en partenariat avec le Laboratoire de médiévistique occidentale de Paris (LaMOP – Paris 1) et l'École nationale des chartes. 26 registres produits par le chapitre cathédral de Notre-Dame de 1326 à 1504 ont été transcrits et sont interrogeables en texte intégral. Carnet de recherche : <https://endp.hypotheses.org/> (site consulté le 22 juillet 2024).

4. Voir dans ce numéro l'article de Marc Bui et al., « eScriptorium et l'IA pour la transcription automatique », p. 55. Le projet LECTAUREP (Lecture automatique de répertoires, 2018-2021) a bénéficié de la convention-cadre entre le ministère de la Culture et l'INRIA (Institut national de recherche en informatique et automatique), partenaire du Minutier central des notaires parisiens des Archives nationales pour la transcription des registres en lesquels les notaires référençaient les actes passés dans leur étude. Carnet de recherche : [www.lectaurep.hypotheses.org](http://www.lectaurep.hypotheses.org) (site consulté le 22 juillet 2024).

5. Il convient à ce titre de signaler le projet SOCFACE qui vise à transcrire les recensements de population de 1836 à 1936, conservés dans les archives départementales. La mise en base de données de ces informations permettra une analyse démographique inédite. Pour en savoir plus : <https://socface.site.ined.fr/> (site consulté le 22 juillet 2024) ; voir l'article de Christopher Kermorant, Lionel Kesztenbaum et Manonmani Restif, « Reconstituer l'histoire de la France "par le bas" : un siècle de recensements de population décryptés par le projet Socface », *Culture et Recherche*, n° 144, printemps-été 2023, p. 35-37.

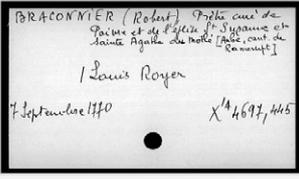
6. Le projet a également bénéficié de la convention-cadre entre le ministère de la Culture et l'INRIA. Voir Florence Clavaud, Laurent Romary, Pauline Charbonnier, Lucas Terrier, Gaetano Piraino et Vincent Verdese, « NER4Archives (*named entity recognition for archives*). Conception et réalisation d'un outil de détection, de classification et de résolution des entités nommées dans les instruments de recherche archivistiques encodés en XML/EAD », *Atelier Culture-INRIA*, Ministère de la Culture, mars 2022 (hal-03625734).

7. <https://www.siv.archives-nationales.culture.gouv.fr>

SIMARA Tableau de bord Formulaires Assigner des tâches Jean-François Moufflet - A

## Réponses sur Page 0007 (FRAN\_IR\_001428\_08.pdf)

1. Tâche effectuée **TERMINÉE** Détails de la tâche Télécharger au format XML E



Champ	Valeur
Cote : Série	XIA
Cote : Article	4697
Date	7 septembre 1770
Intitulé	BRACONNIER (Robert) Prêtre curé de Poivre et de l'église Sainte-Suzanne et sainte Agathe du Mothé [Aube, canton de Ramerupt]
Analyse complémentaire	Contre Louis Royer
Cote :	445
Pièce/Folio	
Entité	Catégorie

Aucune entité à montrer

Administrateur

XML

VALIDÉ

```
<accessrestrict>
</accessrestrict>
<dsc>
<c>
<did>
<unitid type="cote-de-consultation">XIA//4697</unitid>
<unitid type="pieces">445</unitid>
<unittitle>BRACONNIER (Robert) Prêtre curé
Poivre et de l'église Sainte-Suzanne et sainte Agathe du Mothé [Aube, canton de Ramerupt]</unittitle>
<unitdate normal="1770-09-07"
calendar="gregorian" era="ce">7 septembre
1770</unitdate>
</did>
<scopecontent>
<p>Contre Louis Royer</p>
</scopecontent>
</c>
</dsc>
</archdesc>
</ead>
```

Interface de SIMARA : fiche d'inventaire, transcription dans le formulaire, visualisation de son encodage en XML EAD.

© Archives nationales

à un problème particulier, à savoir qu'un certain nombre de fonds dont il est responsable ont déjà fait l'objet de nombreux inventaires, allant du XVIII<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle, qui se présentent sous la forme de registres ou de fichiers. Certains sont toujours utiles, mais ils n'ont jamais été convertis au format numérique tout en n'étant pas accessibles au public en salle de lecture en raison de leur volumétrie. On a estimé qu'il y avait 800 000 fiches et 10 000 pages d'inventaires à traiter. C'est une masse considérable, et convertir de tels inventaires au format EAD nécessiterait beaucoup de temps s'il fallait saisir l'inventaire dans un traitement de texte, puis l'encoder manuellement en XML. Ces tâches sont chronophages, répétitives et, dans le cas de l'encodage, délicates.

Comme son nom l'indique, SIMARA (Saisie d'inventaires manuscrits par reconnaissance automatique) vise précisément à aider les archivistes dans cette tâche de rétroconversion numérique d'inventaires anciens. Il a bénéficié en 2021 d'un financement du plan France Relance, le ministère de la Culture n'ayant eu à assumer que 25 % des frais. La solution a été développée par la société Teklia, spécialisée en intelligence artificielle appliquée au patrimoine documentaire<sup>8</sup>.

SIMARA se présente sous la forme d'une interface qui permet de charger les inventaires préalablement numérisés en mode image. Les archivistes définissent pour chaque inventaire un formulaire dont les champs constituent les différentes catégories d'informations qui y sont consignées. SIMARA est adossée à la plateforme de traitement de Teklia, Arkindex, qui va se charger de deux tâches : la transcription du texte de l'inventaire et la structuration des données. Ce sont à la fois l'HTR et la NER qui sont invoqués : l'un permet d'obtenir le texte brut de la source, l'autre d'identifier les informations et de les répartir dans les bons éléments du formulaire. Ce dernier correspond en réalité à des éléments de balisage XML EAD. Ainsi, deux tâches réalisées auparavant séparément sont cette fois-ci menées conjointement et en quelques heures. Une intervention manuelle demeure bien entendu nécessaire, celle du contrôle de la qualité : l'archiviste relit les transcriptions et les corrige. Il récupère ensuite

directement un fichier XML EAD qu'il pourra publier sur le site des Archives nationales, permettant *in fine* d'offrir aux lecteurs des instruments de recherche longtemps inaccessibles.

Afin de réaliser une telle opération, il faut comme toujours procéder à un entraînement de l'intelligence artificielle. Il suffit pour cela de transcrire directement dans le formulaire une centaine de fiches. Si après transcription, on constate un taux d'erreur trop important, Teklia réentraîne le modèle à partir des premières corrections effectuées par les archivistes.

### Constats

SIMARA est un projet original car il est le premier à s'être consacré aux inventaires d'archives. Il constitue un outil qui s'intègre pleinement dans le processus de travail de l'archiviste.

Son originalité réside également dans le développement d'un modèle *Open source* (DAN – *Document Attention Network*) utilisant conjointement l'HTR et la NER, qui soit suffisamment plastique pour s'adapter à des écritures comme à des mises en page extrêmement variées. Il ne s'agit pas d'utiliser, comme dans les projets précédents, un modèle qui segmente le document ligne à ligne pour restituer fidèlement l'emplacement du texte original sur la page, car ce n'est pas utile ici. Il s'agit plutôt d'embrasser le contenu d'ensemble d'une page pour qualifier plus efficacement le texte. Le projet SIMARA est l'un des premiers à s'être placé dans cette approche<sup>9</sup>.

L'intelligence artificielle apporte ici une aide appréciable : elle réalise des tâches longues et peu qualitatives (la transcription), ou bien des opérations plus techniques (l'encodage). Un tel outil représente donc un gain de temps considérable, car une fois le modèle bien entraîné – ce qui ne sollicite pas, ici non plus, beaucoup de temps –, un inventaire de 100 000 fiches peut être prétraité en quelques heures. En revanche, il ne saurait affranchir l'archiviste d'un indispensable contrôle de la qualité qui, de fait, demeure long et incompressible. Il y aura toujours besoin d'archivistes (qui devront être suffisamment bons paléographes, s'agissant de fonds anciens) pour contrôler la qualité des résultats de l'intelligence artificielle. ■

8. Voir dans ce numéro : Édouard de Saint-Ours et Christopher Kermorvant, « Le projet HikariA : étude et mise en valeur du patrimoine photographique japonais par l'intelligence artificielle », p. 20.

9. Plus de détails sur ces choix dans Solène Tarride, Mélodie Boillet, Jean-François Moufflet et Christopher Kermorvant, « SIMARA : A database for key-value information extraction from full-page handwritten documents », dans Gernot A. Fink, Rajiv Jain, Koichi Kise et Richard Zanibbi (eds), *Document Analysis and Recognition – ICDAR 2023. 17th International Conference*, Springer, 2023, p. 421-437. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-41682-8\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-031-41682-8_26)

# LES MINUTES DES TABELLIONS NORMANDS (XIV<sup>E</sup>-XVII<sup>E</sup> SIÈCLES) ET L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : LE PROJET TABELNORM

Les Archives départementales de la Seine-Maritime (ADSM) possèdent un fonds unique d'archives du tabellionage, nom du notariat de la France coutumière (au nord de la ligne La Rochelle-Genève)<sup>1</sup>. Une équipe interdisciplinaire de chercheurs travaille en synergie pour mettre à disposition ce trésor archivistique assez inaccessible en combinant Intelligence humaine (IH) et Intelligence artificielle (IA) : c'est le projet TabelNorm (Tabellionage normand).

## Les tabellions de Rouen

Les tabellions de Rouen étaient les officiers royaux qui rédigeaient, authentifiaient et enregistraient en français les actes pour leurs clients, comme le font les notaires de nos jours. L'exemple, mis en forme (« grosse »), était remis aux clients, mais les tabellions en conservaient une version abrégée (« minute »), recopiée au fur et à mesure de leur établissement dans des registres (430 × 400 mm, 400 pages en moyenne).

Ces fonds constituent une clé de compréhension de Rouen et de ses alentours : structures familiales, métiers, usages et croyances, habitat, procédures judiciaires, accès à l'eau...

## Les verrous techniques et scientifiques

Or le notariat des pays de coutumes souffre d'un déficit de recherche, contrairement aux notaires méridionaux des pays de droit écrit, précocement étudiés par les historiens du droit<sup>2</sup>. L'inexploitation de ces fonds s'explique par la masse volumétrique d'actes qui se comptent par millions. De plus, le déchiffrement des minutes, qui sont sévèrement abrégées – en particulier pour les formules juridiques éludées par de laconiques « etc. » –, suppose que leurs lecteurs soient experts en lecture des écritures anciennes (paléographie).



## MARIE GROULT

Cheffe du service des collections et du développement scientifique, pôle des archives historiques, archives départementales de la Seine-Maritime

## LYDWINE SCORDIA

Professeure d'histoire médiévale, Université de Rouen Normandie

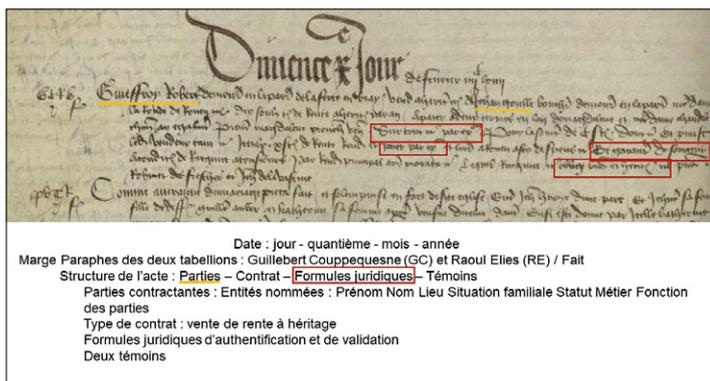
Le « monstre de 1582 », ADSM, 2 E 1/365 – Parchemin – 1<sup>er</sup> janvier-30 juin 1582 – 1 344 vues.

## Les enjeux de TabelNorm

Le projet de recherche TabelNorm, développé par des historiens, informaticiens et juristes de l'Université de Rouen Normandie, en partenariat avec les ADSM, vise à permettre l'exploitation des registres par l'HTR (*Handwritten text recognition*)<sup>3</sup>, c'est-à-dire la reconnaissance automatique de l'écriture manuscrite des tabellions, en vue de collecter des millions de données (noms, lieux, métiers, dates, monnaies, types d'acte...) et ainsi de constituer une base de données fiable et exhaustive. Pour expérimenter la suite logicielle HTR, nous avons choisi l'année 1465 (ADSM, 2 E 1/193-194,

474 pages, plus de 2 800 actes), en raison de l'intensité des échanges à Rouen pendant la guerre du Bien public contre Louis XI. La première étape a consisté en une transcription manuelle (IH) d'environ 20 % du corpus pour apprendre à lire à l'automate et lui permettre de reconnaître les 80 % restants grâce à une équipe d'historiens et d'informaticiens<sup>4</sup>.

TabelNorm participe à l'intense exploitation des sources archivistiques grâce à l'IA, pour désenclaver des fonds inaccessibles et mettre à disposition des millions d'informations sur la Normandie des XIV<sup>e</sup>-XVII<sup>e</sup> siècles. ■



1. ADSM, séries 2E1, 2E14, 2E59, soit 5 300 registres, 4 km linéaires. <https://www.archivesdepartementales76.net/archive/recherche/notariat/n:157>

2. Volumes récents consacrés aux tabellionages : Mathieu Arnoux et Olivier Guyotjeannin (dir.), *Tabellions et tabellionages de la France médiévale et moderne*, École nationale des chartes, 2011 ; Jean-Louis Roch (dir.), *Tabellionages au Moyen Âge en Normandie. Un notariat à découvrir*, Presses universitaires de Rouen et du Havre, 2014 ; lire : *Richesse du tabellionage normand au Moyen Âge*, Lydwine Scordia (dir.), *Tabularia*, 2020-2024 (dossier en ligne).

3. Voir Édouard Bouyé, « "Lettres en Lumières" : l'Intelligence artificielle appliquée aux décrets des États de Bourgogne », *Culture et Recherche*, n° 144, printemps-été 2023, p. 110-112 ; et dans ce numéro : Jean-François Moufflet, « L'intelligence artificielle au service du traitement des archives : l'exemple du projet SIMARA », p. 58.

4. Transcription collaborative réalisée par une équipe d'universitaires, étudiants et paléographes chevronnés.

Entités nommées, ADSM, 2 E 1/193 – Parchemin – 10 février 1465.

# Les nouvelles technologies à l'École nationale supérieure d'art et de design de Limoges (ENSAD Limoges): un outil pour la création

De la réinterprétation créative des œuvres du FRAC-Artothèque du Limousin, grâce à la réalité virtuelle avec « Transmutation d'une collection », aux modélisations et impressions 3D céramique du labo CCE ou à l'usage de l'intelligence artificielle dans les pièces de diplômes, les projets développés à l'ENSAD Limoges permettent une réflexion ancrée et actuelle sur la place des nouvelles technologies dans la création.

## DELPHINE DE BOISSÉSON

Directrice des études et de la recherche,  
ENSAD Limoges

## ANTOINE SCHACHERER

Designer, diplômé de l'ENSAD Limoges

### Création et nouvelles technologies à l'ENSAD Limoges

Une école d'art et de design est un lieu de création plastique, de pensée artistique, de formation d'un sens critique, à l'écoute de son temps et préparant l'avenir. Ainsi les propositions pédagogiques formulées par les enseignants de l'ENSAD Limoges sont-elles empreintes de contemporanéité et d'une démarche de recherche au sein de laquelle les nouvelles technologies occupent une place grandissante. Les rapports de l'IA et de la création étaient au cœur du sujet de culture générale du concours d'entrée 2024.

Dès 2015, le laboratoire CCE (la Céramique comme expérience) est conçu comme un « pôle d'expertise, de pédagogie, de recherche et lieu d'innovation » qui « s'inscrit dans la révolution numérique actuelle » avec un esprit d'expérimentation<sup>1</sup>. Les recherches qui s'y mènent interrogent la place de la céramique à l'heure des nouvelles technologies, notamment les possibilités offertes par la modélisation et l'impression 3D, renouvelant ainsi la manière de concevoir une forme et de porter un discours plastique. Impliqué à tous les niveaux de la pédagogie, le labo CCE initie étudiants et résidents aux nouvelles technologies sur le plan technique, et encourage à concevoir l'impression 3D céramique comme outil au service d'une démarche plastique ou design, aux frontières de l'art, du design, de la science et de la technique.

Voyant dans les nouvelles technologies un outil permettant de renouveler la création, Fabrice Cotinat, artiste et enseignant à l'ENSAD, avec Cédric Massart, développeur informatique, et David Legrand, artiste invité, conçoivent le programme d'étude et de recherche « Transmutation d'une collection »<sup>2</sup>

en 2022. Ce dispositif expérimental propose de combiner, par une IA, des œuvres numérisées des collections du FRAC Artothèque Nouvelle-Aquitaine avec les travaux de quatre étudiants, Étienne Muller, Léo Sallanon, Aimy Vaillant et Keshu Yan.

À chaque fois, des propositions hybrides naissent et donnent à voir des formes nouvelles; elles interrogent la place de l'artiste et de l'œuvre dans le dispositif et, plus largement, dans le champ de la création à l'heure des technologies génératives, mais questionnent aussi la notion de propriété intellectuelle ou de droit d'auteur.

La restitution du travail, qui a d'abord pris la forme d'une déambulation avec casque de réalité virtuelle au sein de l'école en 2022, fera l'objet d'une exposition immersive sans casque à la réouverture du FRAC-Artothèque au printemps 2025. Ce dispositif appelé CAVE (*Cave automatic virtual environment*) permet d'interpréter les œuvres de la collection par leur métamorphose dans des mondes digitaux, développant une relation unique entre des étudiants, une collection et un public. Pour les étudiants, il s'agit bien souvent d'une première confrontation aux questions d'hybridation numérique et à l'intelligence artificielle comme outil de création plastique.

Les thématiques de recherche de l'école font actuellement une large place aux nouvelles technologies dans la création puisque l'un des trois axes de recherche redéfinis en 2023 porte sur les questions de gestes traditionnels/gestes numériques. L'Atelier de recherche et de création (ARC) Nouvelles Gestualités<sup>3</sup>, mené par Indiana-Collet Barquero, historienne du design, Fabrice Cotinat, artiste, et Jessie Derogy, designer, en a fait son sujet de recherche principal. Les étudiants

1. Michel Paysant (dir.), « Manifeste », *La céramique comme expérience*, Naima et ENSA Limoges, 2019, p. 15.

2. Ce projet a fait l'objet d'un financement dans le cadre de l'appel à projets « Cultures connectées ». C'est un programme de soutien à l'appropriation du numérique par les acteurs culturels mis en place dans un cadre partenarial entre l'État/Direction régionale des Affaires culturelles (DRAC) de Nouvelle-Aquitaine et le Conseil régional de Nouvelle-Aquitaine au sein du contrat Plan État-Région (2021-2027).

3. Le projet vient d'obtenir le soutien financier du ministère de la Culture dans le cadre des appels à projet Radar et Culture Pro.



de master sont invités à rechercher les possibilités de création offertes par la captation des gestes des métiers et les intelligences artificielles génératives, dans un aller-retour entre gestes traditionnels et outils numériques de pointe. La récolte des gestes comme leur exploitation se fait par le prisme des nouvelles technologies (Réalité virtuelle-Réalité augmentée [RV-RA], algorithmes, automatisation, IA, métavers, impression 3D notamment) et de la robotique. Les croisements qui s'opèrent au sein de cet ARC permettent de revisiter le rapport aux savoirs tout en renouvelant les manières de « faire »<sup>4</sup>. Lors de la remise des diplômes en juin 2024, des casques RV permettaient de visualiser les créations des étudiants dans une réserve de musée d'un nouveau genre ouvrant sur des salles virtuelles, le déplacement du spectateur déclenchant des dispositifs sonores et vidéos inédits.

### Antoine Schacherer : l'IA comme outil du design ou un design sans auteur<sup>5</sup>

Le travail d'Antoine Schacherer, qui a obtenu le Diplôme national supérieur d'expression plastique (DNSEP) en design en juin 2023, se déploie dans ce contexte. Que ce soit dans ses projets ou dans son mémoire de master<sup>6</sup>, il questionne la notion d'écriture en utilisant tous les outils à sa disposition, s'inscrivant ainsi dans la lignée des « designers 2.0 » comme Laureline Galliot et son casque de réalité augmentée lui permettant de dessiner ou encore Gavin Munro qui fait pousser du mobilier.

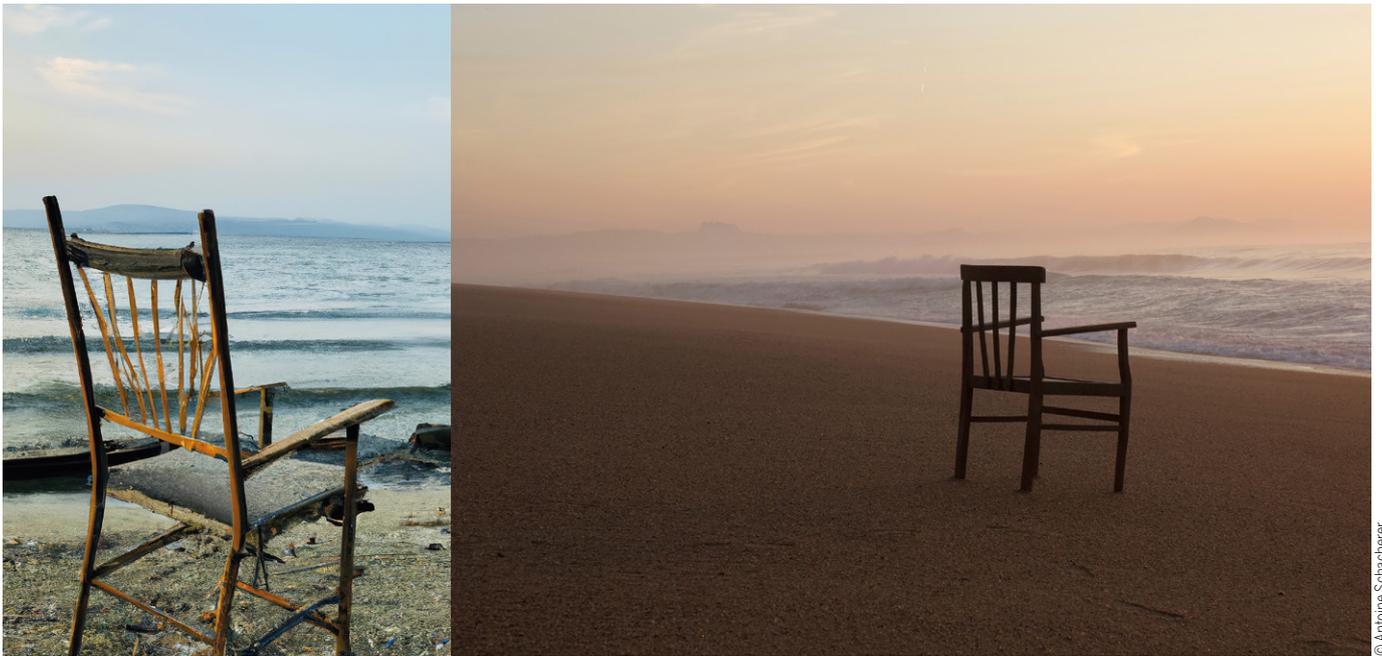
À la faveur d'une rencontre avec Ronan Bourroulec, Antoine Schacherer met en place un protocole consistant à demander à des personnes ordinaires de dessiner des objets à partir des descriptions qu'il propose, après quoi il sélectionne certains dessins à réaliser. C'est par la suite qu'il choisit de remplacer les humains par l'IA, considérant que ces outils peuvent

Restitution du projet de recherche  
« Transmutation d'une collection »,  
juin 2022.  
© Fabrice Cotinat

4. ARC(S) – ENSAD Limoges  
([ensad-limoges.fr](http://ensad-limoges.fr))  
(site consulté le 21 juin 2024).

5. *Catalogue des diplômés de DNSEP 2021-2023*, « Antoine Schacherer », ENSAD Limoges, 2023, p. 84-85.

6. Antoine Schacherer, *Quelles histoires ! Ou les tentatives d'écritures et autres barbouillis d'un jeune designer*, École nationale supérieure d'art de Limoges, 2022.



Ma meilleure chaise du monde,  
photo numérique à droite inspirée  
de l'image générée à gauche, 2023.

être le terrain d'expérimentation idéal pour de nouveaux protocoles. Par là, il interroge l'auctorialité des objets produits et la place même du designer.

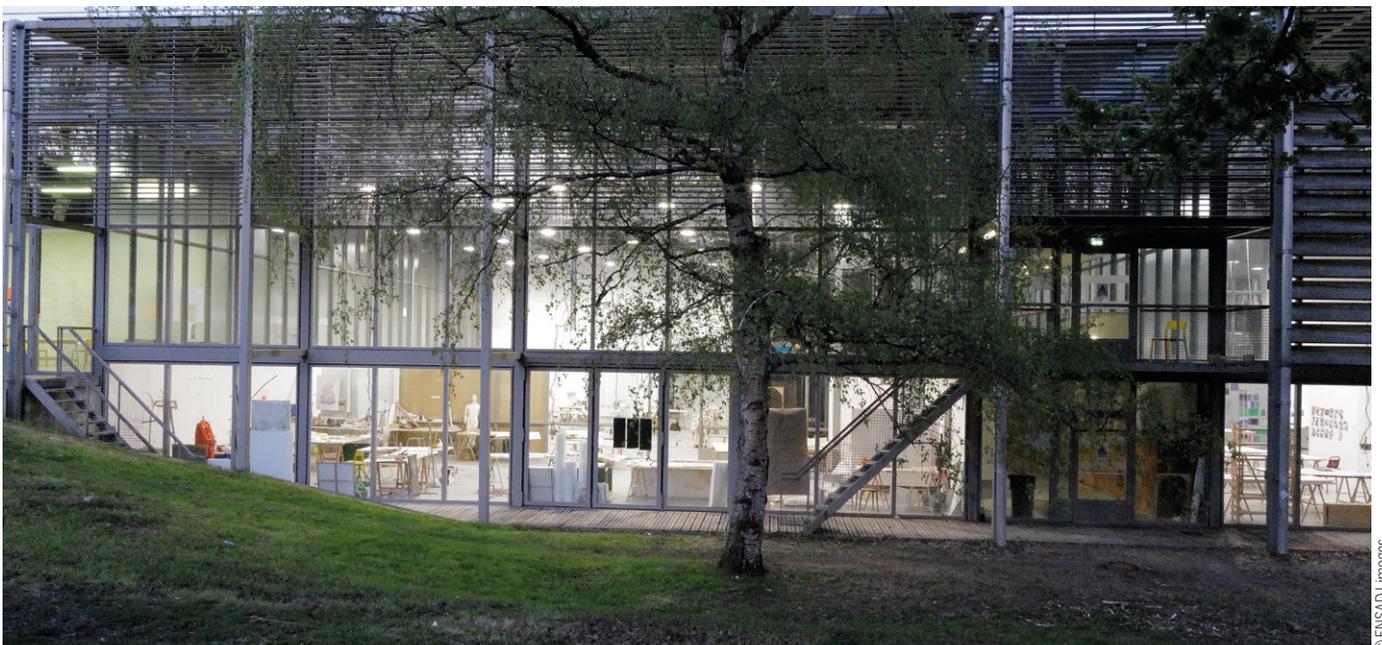
Lorsqu'il pose la question « quelle est la meilleure chaise du monde ? » à une IA générative d'images, le résultat est une surprise : une simple chaise en bois face à l'océan. « Je pensais voir une chaise farfelue, dans un esprit futuriste, ou encore une chaise emblématique du design, mais non. Rien de tout cela. Elle m'a proposé une sorte d'archétype de chaise en bois », constate-t-il.

Considérant que cette image générée par intelligence artificielle n'a aucune valeur, Antoine Schacherer la recompose dans la réalité, à partir d'une chaise trouvée dans son ancienne maison de famille qu'il déplace dans les vignes, les champs, les forêts, au bord de l'océan. « Cette chaise qui était une image artificielle est ainsi devenue la meilleure chaise du monde, elle est devenue ma réalité, elle est devenue ma

meilleure chaise du monde », explique-t-il. Il fait ainsi de l'IA un outil au service de son travail créatif comme un fusain l'est du dessin, le designer opérant ensuite des choix, proposant des interprétations et décidant des réalisations à envisager. Or la capacité d'un outil à générer des formes par lui-même n'interroge-t-elle pas aujourd'hui la légitimité de la discipline et la raison d'être du designer ? C'est à ces questions que le travail d'Antoine Schacherer tente de répondre.

Comme un prolongement de ces questionnements, Liu Zeqing présente, pour son diplôme de DNSEP en juin 2024, un travail vidéo révélant la frontière tenue entre histoire réelle et histoire inventée par l'IA à partir d'images réelles. Quel sens peut encore avoir l'histoire si une IA est capable d'inventer des images, *a fortiori* lorsque le résultat édulcore le contenu des images d'origine, et quelle peut être la responsabilité de son créateur ? ■

Vue extérieure de l'École nationale  
supérieure d'art de Limoges, avril 2021.



# Les instruments de la conception : vers un cadre théorique de la co-créativité computationnelle

Les Systèmes d'intelligence artificielle (SIA) et les Intelligences artificielles génératives (IAG) prennent une place croissante dans les activités de conception architecturale et urbaine, en accélérant la production automatique de contenus synthétiques (images, modèles 3D, textes, sons ou vidéo). Il s'agit pour nous de regarder l'impact de ces techniques sur les processus et les activités de conception afin de définir un cadre théorique de la co-créativité computationnelle.

### Phylogénèse des machines à dessiner et ancrage historique de l'IA

Il s'agit de positionner les SIA dans l'histoire longue de l'évolution des techniques et des systèmes de connaissance, en considérant leurs articulations avec les évolutions culturelles, sociétales et scientifiques, ainsi qu'avec les formes et les techniques de la connaissance. La liste des outils, des instruments et des « machines à dessiner » qui accompagnent ou rendent possible les activités de dessins et de représentations est longue. Du pantographe à la grille de repérage de Robert Fludd, en passant par les conicographes<sup>1</sup> ou encore les intégraphes<sup>2</sup>, une longue et progressive mise au point de dispositifs d'assistance à la mesure et aux tracés se constitue.

Si ces instruments trouvent des applications pratiques, ils témoignent également des connaissances scientifiques, mathématiques et techniques de l'époque qui les a vues naître<sup>3</sup>. Parallèlement et progressivement, des « machines à raisonnement » sont mises au point.

Le philosophe, poète et théologien espagnol Ramon Llull (1232-1315) envisage de formaliser des raisonnements à l'aide d'un appareil mécanique permettant la combinaison de lettres et de mots pour générer de nouvelles idées<sup>4</sup>. Les premières « machines calculantes » se réalisent avec les bâtons de John Napier (1550-1617) ou la Pascaline de Blaise Pascal (1623-1662). Quelques années plus tard, les premiers automates sont fabriqués, ils constituent des objets de curiosité, faisant le tour des foires et des cours européennes. À titre d'exemple, Jacques Vaucanson (1709-1782), inventeur et mécanicien français, met au point le Canard digérateur, le Flûteur et le Tambourinaire<sup>5</sup>.

Vaucanson se consacrera par la suite à l'invention de métiers à tisser automatiques, et nous mesurons ici la manière avec laquelle les évolutions techniques induisent des transformations sociales et productives. Les relations entre le monde de l'abstraction et le monde matériel se renforcent au XIX<sup>e</sup> siècle avec la fabrication de la « machine à différences » de Charles Babbage (1791-1871).

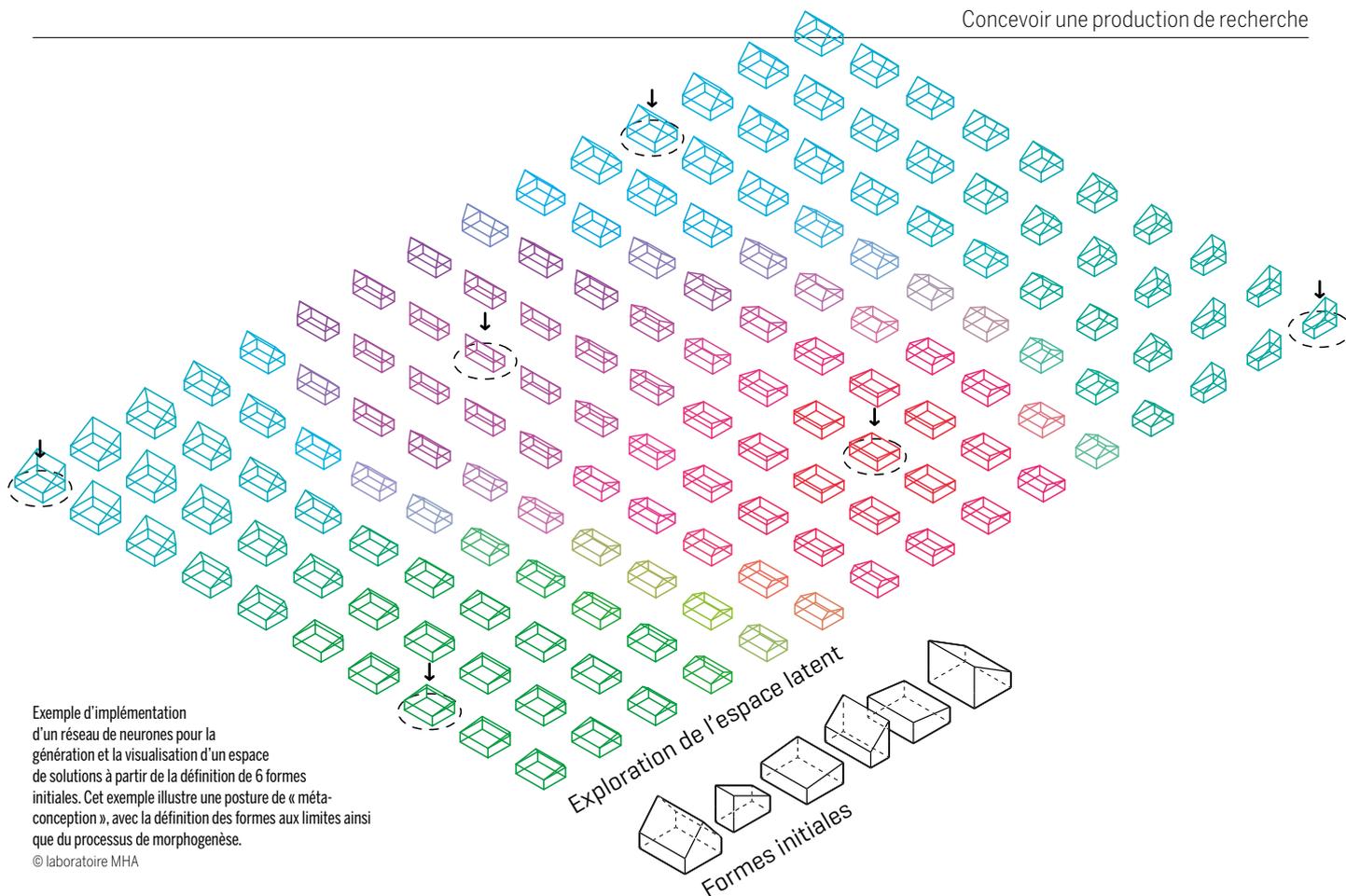
En allant du calcul à l'encodage du langage, le réseau de télégraphes aériens de Claude Chappe (1763-1805) constitue un moyen de communication visuelle qui permet la transmission d'un message par signaux télégraphiques de sémaphores en sémaphores à travers l'Hexagone. Il faudra encore quelques années pour voir la naissance de l'« informatique », contraction des termes « information » et « automatisme ». Avec la cybernétique, le signal électrique devient le support du message, les principes d'émergence et d'auto-organisation sont expérimentés et des systèmes artificiels dynamiques sont réalisés avec la mise en œuvre de boucles rétroactives. L'ordinateur ainsi que le concept d'« intelligence artificielle » apparaissent, ils s'appuient à la fois sur l'ingénierie de l'électromécanique, qui rend possible la fabrication des machines, et sur les mathématiques et la statistique qui envisagent de nouvelles formes de description de la réalité. Les capacités de calcul permettront par la suite d'accentuer la place de la pensée algorithmique en ouvrant la voie à la pensée computationnelle.

Les outils, les instruments et les machines constituent des formes de matérialisation et d'encodage de la connaissance et l'IA peut alors être considérée comme une nouvelle forme d'externalisation de la pensée humaine<sup>6</sup>.

### PHILIPPE MARIN

Professeur, directeur du laboratoire Méthodes et histoire de l'architecture (MHA) / École nationale supérieure d'architecture (ENSA) de Grenoble, Université Grenoble Alpes

1. Dominique Raynaud, « Le tracé continu des sections coniques à la Renaissance : applications optico-perspectives, héritage de la tradition mathématique arabe », *Arabic Sciences and Philosophy*, vol. 17, n° 2, 2007, p. 299-345. <https://doi.org/10.1017/S0957423907000422>
2. Marie-José Durand-Richard, « Planimeters and intergraphs in the 19th century. Before the differential analyser », *Nuncius*, vol. 25, n° 1, 2010, p. 101-124. [10.1163/221058710X00068](https://doi.org/10.1163/221058710X00068)
3. Andrew Witt, *Formulations: Architecture, Mathematics, Culture*, MIT Press, 2022.
4. Peter Weibel, « Ramon Llull: Poet and pioneer of digital philosophy », dans Amador Vega, Peter Weibel et Siegfried Zielinski (eds), *Diá-logos. Ramon Llull's Method of Thought and Artistic Practice*, University of Minnesota Press, 2019.
5. Jacques Vaucanson, *Le mécanisme du flûteur automate. Académie royale des sciences [1738]*, Hachette BNF, 2019; Chantal Spillmaecker (dir.), *Vaucanson & l'homme artificiel. Des automates aux robots*, PUG, 2010.
6. Jürgen Renn, *L'évolution de la connaissance. Repenser la science pour l'Anthropocène*, trad. Raymond Clarinard, Les Belles Lettres, 2022.



Exemple d'implémentation d'un réseau de neurones pour la génération et la visualisation d'un espace de solutions à partir de la définition de 6 formes initiales. Cet exemple illustre une posture de « méta-conception », avec la définition des formes aux limites ainsi que du processus de morphogenèse.

© laboratoire MHA

### Épistémologie de l'IA

Les formes de la connaissance accompagnent les activités cognitives et celles-ci sont rendues possibles par la succession de cycles d'internalisation, associés à l'usage des outils, et d'externalisation des modèles mentaux dans de nouveaux instruments<sup>7</sup>. L'usage de l'instrument ouvre de nouveaux horizons et induit un accroissement du degré d'abstraction. Cependant, chaque instrument s'accompagne de déformations et peut induire des aberrations. Pasquinelli<sup>8</sup> prend l'exemple des lentilles des microscopes, qui ne sont pas parfaitement curvilignes et lisses et qui génèrent des distorsions à leurs limites. La « lentille logique » de l'IA est associée à des erreurs et à des biais. Elle s'accompagne d'une diffraction de la rationalité, le schéma conventionnel de la pratique scientifique (observation, hypothèse et évaluation) est

bouleversé. Le principe de la causalité est complété par la construction automatique de corrélations. Si l'IA est un nouveau régime de vérité et de preuve scientifique, elle impose également de nouvelles normativités sociales et culturelles, qui se construisent à travers des « hallucinations statistiques ». Pour envisager l'appropriation inventive des SIA, il apparaît nécessaire de comprendre l'échafaudage des modèles scientifiques et techniques, des facteurs sociaux et idéologiques, ainsi que les imbrications historiques de ce système de connaissance. Si la voie de l'IA symbolique, associée aux systèmes experts, a été d'abord explorée, c'est une IA connexionniste<sup>9</sup> qui retient depuis quelques années l'attention des scientifiques et des acteurs économiques. Cette dernière est adossée à une stratégie de pondération des relations entre des composantes discriminantes d'un système.

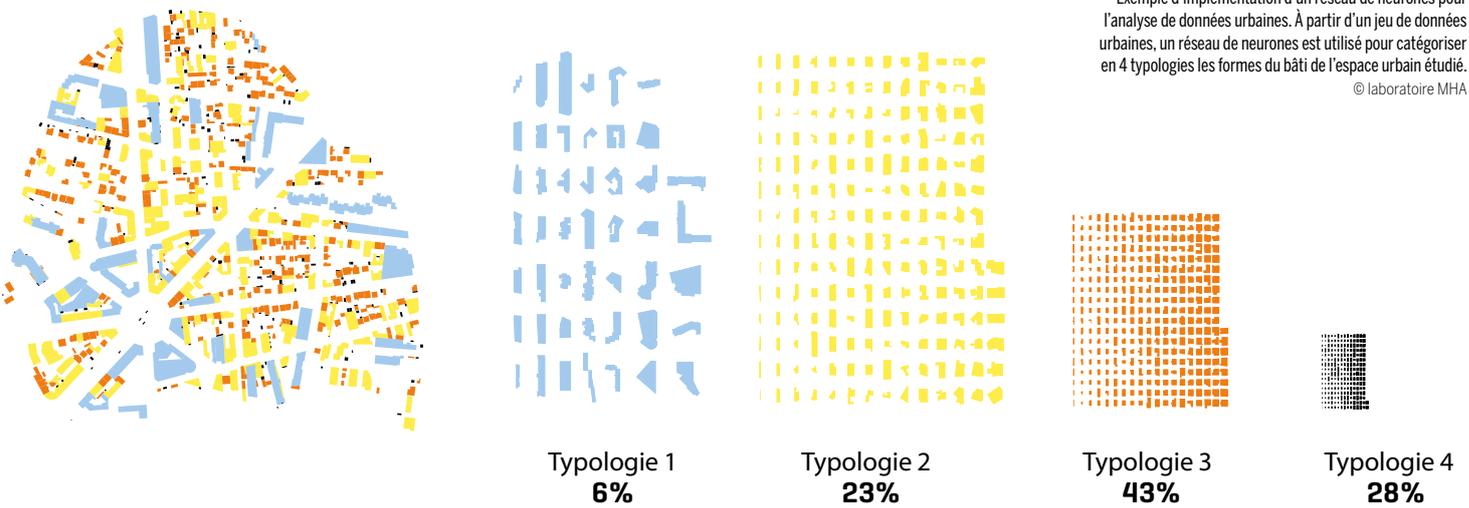
7. Peter Damerow, *Abstraction and Representation. Essays on the Cultural Evolution of Thinking*, Springer, 1996. 10.1007/978-94-015-8624-5; <http://link.springer.com/10.1007/978-94-015-8624-5> (sites consultés le 25 juin 2024).

8. Matteo Pasquinelli et Vladan Joler, « The Noosope manifested: AI as instrument of knowledge extractivism », *AI & SOCIETY*, n° 36, 2021, p. 1263-1280. 10.1007/s00146-020-01097-6

9. Dominique Cardon, Jean-Philippe Cointet et Antoine Mazières, « La revanche des neurones. L'invention des machines inductives et la controverse de l'intelligence artificielle », *Réseaux*, vol. 211, n° 5, 2018, p. 173-220. 10.3917/res.211.0173

Exemple d'implémentation d'un réseau de neurones pour l'analyse de données urbaines. À partir d'un jeu de données urbaines, un réseau de neurones est utilisé pour catégoriser en 4 typologies les formes du bâti de l'espace urbain étudié.

© laboratoire MHA



Typologie 1  
6%

Typologie 2  
23%

Typologie 3  
43%

Typologie 4  
28%

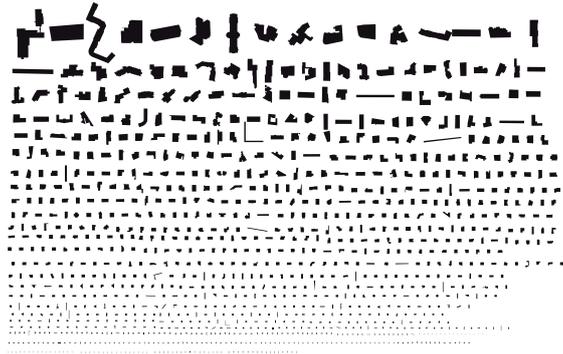
Collecter



Apprendre



Analyser



Catégoriser



Illustration du processus de prédiction du type de bâti d'un morceau de ville à partir de l'apprentissage d'un réseau de neurones.  
© laboratoire MHA

### Travaux et expérimentations scientifiques autour de l'IA

Il serait trop long de dresser une liste exhaustive des usages de l'IA dans le domaine de l'architecture, c'est pourquoi seuls trois exemples sont évoqués. Le premier envisage l'IA à des fins analytiques et permet une catégorisation des données urbaines. Les deux autres exemples prennent place dans le processus de conception architecturale par la mise en œuvre d'algorithmes d'Intelligence artificielle générative (IAG). La génération de modèles en 3D est réalisée à partir d'une requête sous forme de texte au sein de l'environnement CAO de l'architecte. Le dernier exemple met en œuvre un algorithme appelé « carte auto-adaptative », il correspond à une classe de réseaux de neurones artificiels, fondée sur un apprentissage non supervisé. Appliqué au domaine de l'architecte, cet algorithme permet de cartographier et d'explorer l'espace des solutions à partir d'une description paramétrique de quelques analogues architecturaux.

### Vers un cadre théorique de la co-créativité computationnelle

Ces expérimentations constituent des supports pour appréhender le fonctionnement de ce système de connaissance et pour envisager comment préparer les futurs architectes à être acteurs de leurs milieux socio-techniques. Les activités de conception et de création sont médiatisées par les outils, les instruments, les machines, l'ensemble des techniques culturelles de matérialisation des connaissances, ainsi que par nos rapports sociaux et par les propriétés physiques de notre cerveau. Que peut être une posture de méta-conception, comment la créativité prend-elle place dans le contexte technique et culturel contemporain, comment s'articulent pensée visuelle et pensée verbale dans un processus algorithmique et computationnel ? Il s'agit donc de définir aussi le cadre théorique de la co-créativité computationnelle. ■

Illustration du processus de génération d'un maillage en 3D à partir de la rédaction d'un *prompt* au sein de l'environnement de modélisation paramétrique. Sur le haut de l'image, la représentation des composants et du modèle associatif en programmation visuelle. Sur le bas de l'image, les différentes vues du modèle 3D. Extensions Grasshopper® développées au sein du laboratoire MHA.  
© laboratoire MHA



# Architecture et intelligence artificielle : quels enjeux ?

Si des travaux antérieurs ont posé les bases de réflexion sur les interactions entre les architectes et les technologies intervenant dans les processus de conception et de production, nous évoquons des avancées récentes de l'apprentissage profond (*deep learning*)<sup>1</sup> pour mettre en évidence des enjeux et des questions que l'Intelligence artificielle (IA) soulève : possibilités créatives, limites et intégration dans les tâches des architectes et des agences.

## CLAIRE DUCLOS-PRÉVET

Docteure, architecte, agence  
Architecture studio

## FRANÇOIS GUÉNA

Professeur, HDR, URM Modèles pour  
l'Architecture et le Patrimoine (MAP),  
équipe « Modélisations pour l'assistance  
à l'activité cognitive de la conception »  
(MAAC)

## ÉLODIE HOCHSCHEID

Maîtresse de conférences, URM MAP,  
équipe « Centre de recherche en  
architecture et ingénierie » (CRAI)

## XAVIER MARSAULT

Chercheur, HDR, URM MAP, équipe  
« Applications et recherches en  
informatique pour l'architecture » (ARIA)

## JOAQUIM SILVESTRE

Maître de conférences, URM MAP,  
équipe MAAC

## Intelligence artificielle : une longue histoire

La notion d'IA apparaît dans les années 1950, dix ans après la conception des premiers modèles de Réseaux de neurones artificiels (RNA) inspirés de la biologie. Les premières recherches utilisent toutefois en grande partie des techniques d'IA symbolique manipulant des connaissances explicites. Il faut attendre les progrès des techniques d'apprentissage machine et la mise à disposition des masses de données produites par Internet pour rendre efficace l'usage d'une IA connexionniste et statistique capable d'apprendre des modèles à partir de données, avec plus ou moins d'autonomie, et les développements spectaculaires qu'on connaît aujourd'hui. S'y distingue depuis 2012 le *Deep learning* (DL), basé sur des RNA formés de couches connectées de neurones, permettant la mémorisation hiérarchique et profonde de dépendances entre des myriades de données.

## Simulation d'intelligence

L'IA actuelle simule certaines productions cognitives de notre intelligence, et non ses fondements<sup>2</sup>. Si les résultats semblent séduisants, le mode opératoire pour y parvenir n'a rien à voir avec elle<sup>3</sup>. Cette IA s'appuie sur une connaissance implicite et statistique du monde numérisé. Au détriment de la vérité et de la causalité, elle vise seulement la vraisemblance.

En revanche, sa force réside dans l'analyse et le croisement massifs de données au-delà des capacités humaines. Le succès du DL vient aussi du fait que le monde est « compositionnel », avec une hiérarchie de niveaux. Ses réseaux étant d'immenses éponges à complexité (captée à toutes les échelles), le DL aboutit à des corrélations plus pertinentes, des modèles plus fins, des données générées plus fidèles.

## Des données aux modèles

Le DL s'appuie sur l'apprentissage de modèles bâtis sur de nombreuses données disponibles/évaluées/annotées, sans recourir à des schémas explicites, servant les champs analytique, prédictif et génératif. Certains modèles massifs (poids, robustesse, coût) sont appelés « modèles de fondation » : ce sont des RNA pré-entraînés sur d'énormes quantités de données, et il suffit souvent de peu de données spécifiques pour les adapter à une nouvelle tâche (ill. 1).

Actuellement se détachent les larges modèles de langage (LLM)<sup>4</sup>, les modèles *text-to-image* (T2I) et *image-to-image* (I2I), qui s'appuient sur une consigne sémantique appelée *prompt*, guidant le générateur par un contexte linguistique et pictural. Mais son édition efficace (*prompt engineering*) est un art difficile et reste l'objet de nombreuses recherches.

## IA et architecture : technologies et usages en devenir

Le métier d'architecte, pluridisciplinaire, implique des tâches variées (production de textes techniques et de descriptifs, de plans détaillés, création d'images, analyse, évaluation et simulation de bâtiments, gestion de chantier, etc.) qui nécessitent des outils et expertises spécifiques. Quels usages de l'IA pour la discipline architecturale sont explorés aujourd'hui ?

1. L'apprentissage profond est un procédé d'apprentissage automatique utilisant des réseaux de neurones possédant plusieurs couches de neurones cachées. Ces algorithmes possédant de très nombreux paramètres, ils demandent un nombre très important de données afin d'être entraînés.

2. Yann le Cun, père du DL, confère à notre intelligence quatre capacités fondamentales : comprendre le monde réel, mémoriser sur le long terme, raisonner, planifier.

3. Même sans unanimité sur sa définition, l'intelligence est reconnue comme la capacité à appliquer des compétences et des connaissances pour prendre de bonnes décisions.

4. Modèles d'apprentissage automatique capables de comprendre et de générer des textes en langage humain.

**Innovation générique, source d'innovations spécifiques à l'architecture**

De nombreuses innovations technologiques, spécifiques ou semi-spécifiques à l'architecture, ont occupé les architectes depuis le déploiement à grande échelle de l'informatique. Par exemple, le BIM (*Building information modeling*)<sup>5</sup> exploite des innovations générales permettant le stockage, le transfert et la gestion des données. L'IA, et en particulier le DL, est quant à elle générale, mais source de nombreuses innovations spécifiques à l'architecture, se positionnant sur une grande diversité d'usages et de tâches.

**Applications de l'IA pour l'architecture**

On identifie trois stratégies de déploiement d'applications IA pour l'architecture :

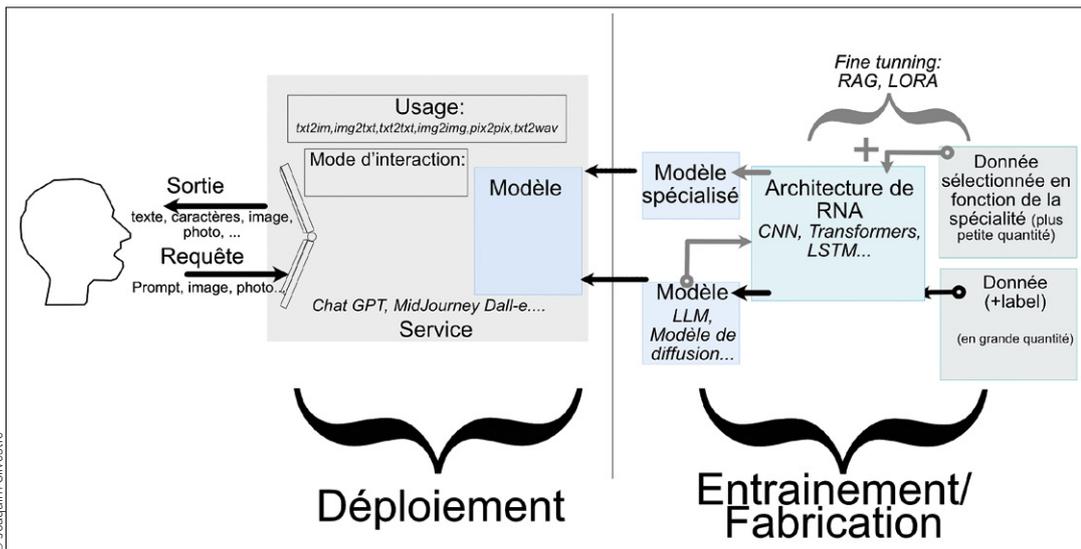
- des IA spécifiques développées pour des architectes;
- des IA générales (LLM, T2I, I2I) que ces derniers s'approprient pour réaliser différentes tâches;
- des IA générales affinées pour les besoins de l'architecture.

Ces stratégies se positionnent sur différents cas d'utilisation : acquisition et visualisation numériques; conception, inspiration et évaluation de la conception; gestion/échange de données dans une logique de performance du bâti. Ces utilisations sont actuellement dominées par la génération sémantique et multimodale de contenus<sup>6</sup>.

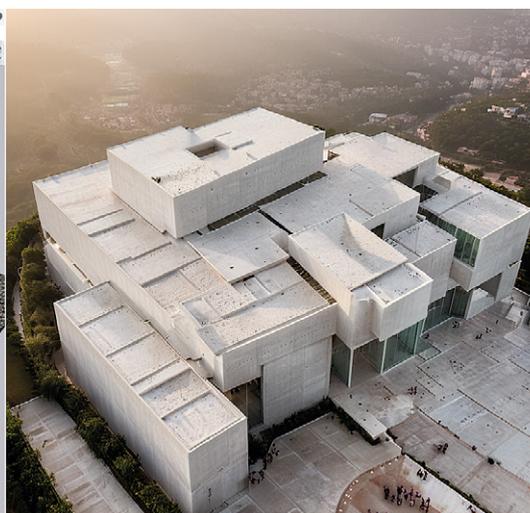
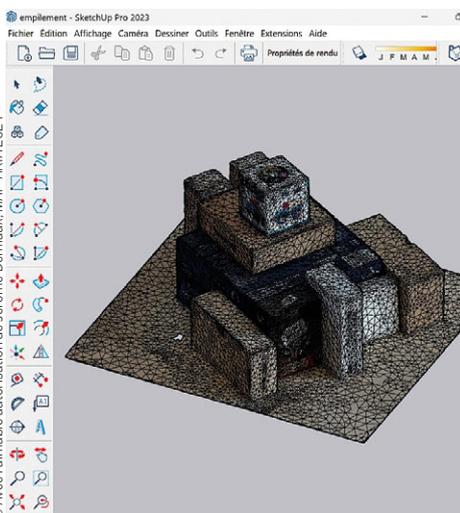
Une partie des recherches s'est focalisée sur la génération de plans, à l'instar du logiciel Rayon<sup>7</sup>, mais ne gère pas encore de programmes architecturaux complexes. Certaines applications de l'IA sont déjà envisagées dans le cadre d'un travail en BIM<sup>8</sup>, pour l'identification d'erreurs ou l'optimisation de planings de chantier.

Les applications les plus répandues concernent la génération d'images. Des IA générales comme Stable Diffusion (SD)<sup>9</sup> et Midjourney<sup>10</sup> commencent à être utilisées par des architectes. ControlNet<sup>11</sup>, non spécifique à l'architecture, permet de générer des images à partir de croquis, photographies de maquettes ou rendus 3D (ill. 2). Des IA spécialisées comme Veras<sup>12</sup> et LookX<sup>13</sup> génèrent des rendus directement à partir

5. Technologie (méthodes et outils) permettant d'alimenter et d'exploiter une base de données contenant les informations d'un ouvrage tout au long de son cycle de vie.
6. Images : croquis, plans, multivues; géométries 2D, 2D½ : plans extrudés, façades, cartes de profondeur; 3D : nuages de points, maillages; graphes : relationnels, spatiaux, fonctionnels.
7. <https://www.rayon.design> (site consulté le 23 juillet 2024).
8. David Bassir *et al.*, « Application of artificial intelligence and machine learning for BIM: Review », *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, n°14, 2023, p. 5, 10.1051/smdo/2023005
9. <https://stability.ai>; <https://stablediffusion.fr/france> (sites consultés le 23 juillet 2024).
10. <https://www.midjourney.com> (site consulté le 23 juillet 2024).
11. Sketch ControlNet peut transformer un dessin d'architecture en un rendu réaliste en combinant plusieurs contrôles. Comme Stable Diffusion, il peut être associé à des images de référence pour appliquer des styles spécifiques à la conception.
12. <https://www.evolvebio.io/veras> (site consulté le 23 juillet 2024).
13. <https://www.lookx.ai/> (site consulté le 23 juillet 2024).



III. 1. Modèles et usages de l'IA.  
  
III. 2. Deux perspectives *in situ* générées (au milieu et à droite) avec Stable Diffusion et l'extension ControlNet pour l'activation des *inputs*: carte de profondeur calculée sous Sketchup et carte de segmentation.



© Avec l'aimable autorisation de Jérôme Demiaux, MAP-ARIA 2024



© Claire Ductos

III. 3. Cabane en bois créée avec Stable Diffusion et deux LoRA : style des estampes chinoises « shuimobysimV3 » et style « green architecture AARG\_greenbuilding ».

14. Sketchup, Revit, Forma, Vectorworks, Rhinoceros.

15. Technique d'entraînement de type PEFT (*Parameter-efficient fine tuning*, ill. 1) qui consiste à ajuster les paramètres d'un modèle de diffusion stable pré-entraîné à l'aide d'un ensemble de données plus petit et spécifique à un domaine, afin de mieux s'aligner sur les besoins spécifiques d'une agence, par exemple. Ces modèles sont souvent partagés gratuitement en ligne, mais les architectes peuvent aussi en construire à partir de leurs propres productions ou références.

16. Lorsque l'on souhaite constituer un RAG sur une grande quantité de textes, il est nécessaire de passer par de la programmation en utilisant des bibliothèques (LlamaIndex, LangChain) ou de la programmation visuelle (<https://flowiseai.com>).

17. Fredy Fortich, « How MVRDV is using AI to design their buildings », *YouTube*, février 2024. <https://www.youtube.com/watch?v=dvKAYTRptkw> (site consulté le 23 juillet 2024).

18. « Architects using AI to design: Tim Fu from Zaha Hadid architects », *YouTube*, juin 2023. <https://youtu.be/K00RzFcT080?si=ExoTquUGthdQrEa6> (site consulté le 23 juillet 2024).

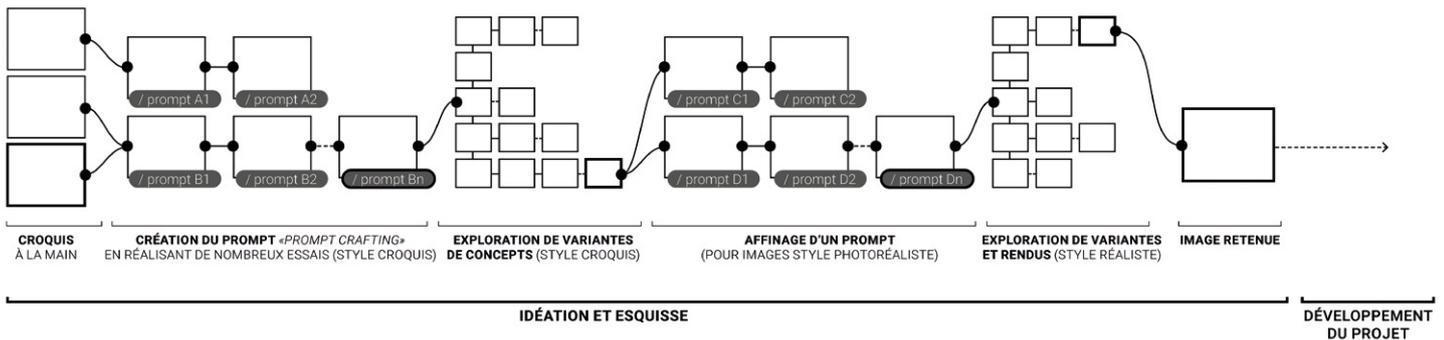
de modèles 3D créés dans des modélisateurs spécifiques à l'architecture<sup>14</sup>.

Les IA générales (LLM, T2I, I2I) peuvent également être affinées avec des données spécifiques à l'architecture : ce procédé est appelé *fine-tuning*, dont deux approches sont LoRA<sup>15</sup> et RAG (ill. 1). Les LoRA (*Low Rank Adaptation*) permettent d'entraîner par exemple un modèle SD avec des images issues de la production d'une agence (ill. 3). La technique RAG (*Retrieval augmented generation*) améliore la précision et la pertinence des réponses d'un LLM en ajoutant au *prompt* des extraits de documents issus de données personnelles. Cela permet la création d'un assistant virtuel pour faciliter la lecture/l'écriture de documents administratifs, techniques ou contractuels comme les CCTP (Cahier des clauses techniques particulières)<sup>16</sup>.

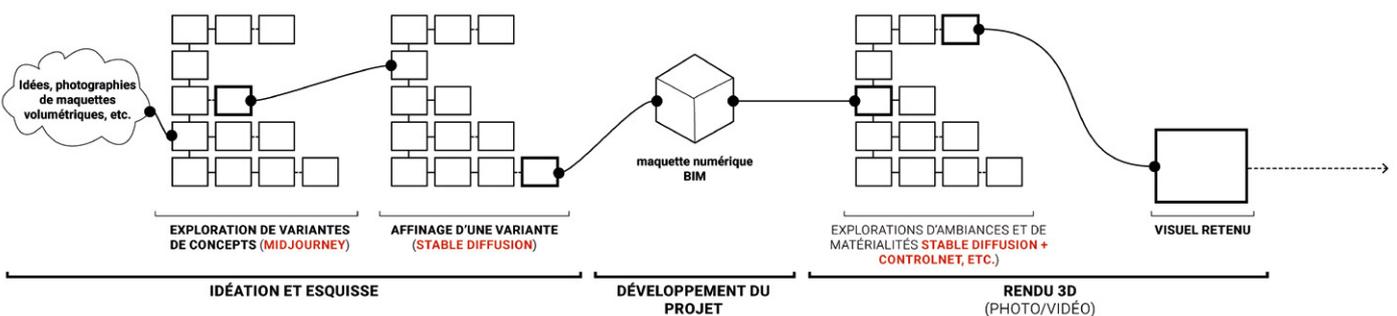
### IA investie par les architectes aujourd'hui : la génération d'images sur-représentée

Des agences d'architecture communiquent sur leurs premières explorations au travers de profils d'architectes emblématiques spécialisés sur l'IA. Chez MVRDV, agence d'architecture et d'urbanisme néerlandaise, les explorations ont été encouragées et centralisées en organisant des temps de partage dédiés<sup>17</sup>. Fredy Fortich a affiné un modèle SD (*Stable diffusion*) avec des images de projets de l'agence *via* LoRA pour générer des résultats plus fidèles à son identité architecturale. La stratégie de MVRDV est basée principalement sur le gain de temps en utilisant du T2I et du I2I pour différents cas d'usage (ill. 4.B). Au sein de Zaha Hadid Architects, Tim Fu<sup>18</sup> appuie son approche sur l'intentionnalité de conception et utilise un *prompt*

#### A. Exemple extrait de processus créatif exploitant du I2I et T2I (d'après interview de Tim Fu, Zaha Hadid Architects)



#### B. Exemple extrait de processus créatif exploitant du I2I et T2I (d'après interview de Fredy Fortich, MVRDV)



#### III. 4. Exemples d'utilisation d'IA génératives.

© Elodie Hochscheid

image/texte où l'image est un croquis réalisé à la main (ill. 4A). Il insiste également sur le fait que lorsqu'une IA est utilisée de cette manière, la majorité du travail du concepteur est ensuite de rationaliser le projet et la géométrie pour les rendre réalisables.

L'IA est cependant utilisée et explorée de façon anecdotique dans les agences, et plutôt dans les plus grandes d'entre elles. Les premiers usages investis concernent la génération d'images pour l'idéation et le rendu. Pourtant, les premiers travaux sur l'impact de l'utilisation de l'IA dans ce cadre mettent en évidence la possibilité d'un effet de *design fixation*<sup>19</sup> lorsqu'elle est utilisée au début de la conception. D'autres usages sont également explorés : Phillip Bernstein<sup>20</sup> les a classés par rapport au degré de réflexion qu'ils nécessitent (se souvenir de, comprendre, analyser, créer, etc.) pour identifier ceux qui peuvent être réalisés avec des IA, incluant des tâches sur les volets administratif, documentation, communication et graphisme, pour lesquels des formations sont proposées aux architectes<sup>21</sup>. Ces usages représentent un vaste marché commun à d'autres entreprises du secteur tertiaire. Les IA génératives, point focal des recherches en architecture, ne sont donc pas alignées avec les besoins de la majorité des agences.

### Retour sur la créativité et l'idéation

Negrotti<sup>22</sup> a suggéré que l'IA peut traiter l'intelligence et la créativité des machines comme un intérêt en soi, plutôt qu'une façon de comprendre celles de l'activité humaine<sup>23</sup>. Cela se produit à l'ère des LLM, du T2I et du I2I, où l'IA générative complète la phase de recherche de références en début de conception de projet<sup>24</sup> et produit des expressions originales de la forme architecturale (ill. 5)<sup>25</sup>. Mais ce sont des représentations orphelines de l'architecture qui en découlent et non des projets définis par un ensemble coordonné et cohérent de documents (plan, coupe, façade, perspective, IFC). Après le transfert de style, la question de la créativité se pose désormais en termes de capacité de (ré)interprétation de solutions issues de l'IA générative, floues ou abouties<sup>26</sup>.

### Conclusion

La rapidité des évolutions technologiques externes (non maîtrisables à notre échelle) complique l'approche prospective sur le développement, l'impact et les possibilités de l'IA pour la conception architecturale, responsable et interprétable. Toutefois, une vision critique est nécessaire, et ces enjeux ne peuvent être abordés sans questionner, tant en recherche qu'en enseignement :

- l'univers numérique construit, en partie dans nos formations, chez les étudiants futurs cadres ;
- les recherches et développements conduits dans nos laboratoires ;
- les questions éthiques et juridiques liées aux données et aux modèles que nos activités génèrent, dont l'acquisition, l'archivage, le traitement et la diffusion posent des questions sécuritaires, de droit et de propriété ;
- les limites d'accès aux données<sup>27</sup> et leurs biais ;



© Xavier Marsault

Ill.5. Génération non supervisée d'une architecture néo-classique avec les logiciels I2I StyleGAN3 et Krea.

- l'impact énergétique et écologique à très forte croissances de l'IA ;
- les limites épistémologiques : l'IA présente à long terme un risque d'uniformisation, car elle élimine les densités insignifiantes et les singularités qui échappent aux moyennes. Calculant trop vite, elle risque de court-circuiter nos processus d'interprétation et de délibération à la base de la créativité mûrie, car ouverts à quelque chose de fondamental : le sens.

Les développements de l'IA nous font déjà comprendre ce qui nous différencie ontologiquement des machines : sens commun, conceptualisation et raisonnement conscientisés. ■

19. Limitation de la capacité du concepteur à s'éloigner de la proposition de l'IA à cause du caractère photoréaliste des images générées. Jonathan Dorthheimer et al., « Think al-side the box ! Exploring the usability of text-to-image generators for architecture students », *Digital Design Reconsidered*, vol. 2, n° 41, 20-22 septembre 2023, p.567-576. [10.52842/conf.eacaade.2023.2.567](https://doi.org/10.52842/conf.eacaade.2023.2.567)

20. Phillip G. Bernstein, *Machine Learning: Architecture in the Age of Artificial Intelligence*, RIBA (Royal Institute of British Architects), 2022.

21. « Gagner en efficacité en agence d'architecture grâce à l'intelligence artificielle », Gepa formation continue des architectes : <https://www.formation-architecte.com/produit/gagner-en-efficacite-en-agence-darchitecture-grace-a-lintelligence-artificielle> (site consulté le 23 juillet 2024).

22. Massimo Negrotti, « Alternative intelligence », dans Massimo Negrotti (ed.), *Understanding the Artificial: On the Future Shape of Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, 1991, p. 55-75.

23. En ce sens, la G-créativité, adaptée à l'IA, est basée sur le pouvoir de générer une nouveauté de valeur et se distingue des processus de connaissance et de résolution de problèmes. Voir : Arthur Still et Mark d'Inverno, « A history of creativity for future AI research », dans François Pachet, Amilcar Cardoso, Vincent Corruble et Fiammetta Ghedin (eds), *Proceedings of the Seventh International Conference on Computational Creativity*, Sony CSL, 2016, p.147-155. <https://www.computationalcreativity.net/iccc2016/proceedings-2016/> (site consulté le 25 juillet 2024).

24. Souvent effectuée par les architectes en phase d'idéation pour stimuler leur créativité de manière plus classique via des moteurs de recherche sur Internet.

25. En jouant avec des archétypes structurels, graphiques et stylistiques appris, elle ouvre de nouveaux espaces créatifs, esthétiques et plastiques.

26. En effet, un objet généré encore riche de potentialités d'interprétation convient bien à l'idéation. Mais s'il est trop achevé, voire hyperréaliste, il devient juste une vitrine à contempler.

27. La collecte, l'étiquetage et le formatage des données d'entraînement posent toujours un problème, notamment en l'absence de jeux de données standardisés pour l'architecture.

### Pour en savoir plus : bibliographie générale

Mario Carpo, *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*, MIT Press, coll. « Writing architecture », 2017.

Yann Le Cun, *L'apprentissage profond : une révolution en intelligence artificielle*, Collège de France, *YouTube*, 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=TdLa5h-x2nA> (site consulté le 25 juillet 2024).

Xavier Marsault, *Architecture générative inspirée*, habilitation à diriger des recherches, INSA de Lyon, 2023. <https://theses.hal.science/MAP-ARIA/tel-04627042v1> (site consulté le 25 juillet 2024).

Nicholas Negroponte, *Soft architecture machines*, MIT Press, 1976.

Molly Wright Steenson, *Architectural Intelligence: How Designers and Architects Created the Digital Landscape*, MIT Press, 2017.

# Potentialités de l'intelligence artificielle pour l'architecture : le laboratoire Modèles pour l'Architecture et le Patrimoine (MAP)

Une communauté de chercheurs et chercheuses des écoles d'architecture françaises poursuit les travaux de ses prédécesseurs sur les applications possibles de l'Intelligence artificielle (IA). Une partie d'entre eux est rassemblée au sein du laboratoire Modèles pour l'Architecture et le Patrimoine (URM MAP<sup>1</sup>) qui regroupe trois équipes de recherche : le MAP-ARIA de l'ENSA de Lyon, MAP-CRAI de l'ENSA de Nancy et MAP-MAACC de l'ENSA de Paris La Villette. Cet article présente les travaux sur l'IA en cours au sein du laboratoire.

## CLAIRE DUCLOS-PRÉVET

Docteure, architecte, agence Architecture studio

## FRANÇOIS GUÉNA

Professeur, HDR, URM Modèles pour l'Architecture et le Patrimoine (MAP), équipe « Modélisations pour l'assistance à l'activité cognitive de la conception » (MAACC)

## ÉLODIE HOCHSCHEID

Maîtresse de conférences, URM MAP, équipe « Centre de recherche en architecture et ingénierie » (CRAI)

## XAVIER MARSAULT

Chercheur, HDR, URM MAP, équipe « Applications et recherches en informatique pour l'architecture » (ARIA)

## JOAQUIM SILVESTRE

Maître de conférences, URM MAP, équipe MAAC

Parmi les recherches en architecture entreprises à partir des années 1970 sous l'égide du ministère de la Culture<sup>2</sup>, des travaux sur les applications de l'informatique à l'architecture se sont rapidement développés. Certains avaient pour objectif d'utiliser la puissance de calcul des ordinateurs pour organiser de manière optimale des espaces en tenant compte de critères d'évaluation et de contraintes<sup>3</sup>. Confrontés à la difficulté de décrire ces processus de conception comme une tâche de résolution de problèmes mathématiques, les chercheurs s'orientent vers l'IA et ses outils dans l'espoir de reproduire des raisonnements de nature heuristique attribués à la conception architecturale<sup>4</sup>. Ces travaux se développent dans différents laboratoires au sein de plusieurs Écoles nationales supérieures d'architecture (ENSA) dès les années 1980 et permettent d'explorer les possibilités et les limites de diverses applications de l'IA à l'architecture et au patrimoine : systèmes experts,

systèmes à base de connaissances, construction d'ontologies, systèmes multi-agents, systèmes évolutionnaires, design paramétrique et optimisation multicritère. Ces recherches, utilisant pour l'essentiel des techniques d'IA symbolique, seront complétées à partir de 2018 par des travaux exploitant les progrès de l'apprentissage profond.

## L'architecture générative avec l'équipe MAP-ARIA

### Projet GenH2Arch<sup>5</sup> (Hybrid Generation for healthy architecture)

Il s'appuie sur l'alliance du *deep learning*<sup>6</sup> (expérience, intuition) et du « design génératif » (adaptation, maîtrise) pour améliorer la conception de projets d'architecture favorables à la santé. Visant à sortir du pipeline traditionnel de l'architecture générative basée uniquement sur l'optimisation, il convoque le volet génératif du *graph deep learning*, adapté au traitement des graphes de description fonctionnelle et spatiale des projets.

## Génération frugale d'images

Ce travail illustre la nature compositionnelle du *deep learning*, parfait exemple des théories de la complexité organisée de l'anthropologue et architecte Christopher Alexander<sup>7</sup> et de la complexité adaptative du théoricien Nikos Salingaros<sup>8</sup>. Il vise à produire des représentations non supervisées d'architecture, difficilement réalisables en mode *text-to-image*, en partant d'une collection

1. <https://www.map.archi.fr> (site consulté le 25 juillet 2024).

2. Éric Lengereau, « La recherche », dans Anne-Marie Câtelet et al. (dir.), *L'architecture en ses écoles. Une encyclopédie de l'enseignement de l'architecture au xx<sup>e</sup> siècle*, Locus Solus, 2022, p. 569-573.

3. *Notes méthodologiques en architecture et en urbanisme*. Tome 2 : *Allocation spatiale*, Institut de l'environnement, 1973.

4. Hebert Simon, *The Sciences of the Artificial*, MIT Press, 1969.

5. Soutenu par la région Auvergne-Rhône Alpes (AURA) et l'agence AIA Life Designers (2021-2026).

6. Ou « apprentissage profond », procédé d'apprentissage automatique utilisant des réseaux de neurones possédant plusieurs couches de neurones cachées. Ces algorithmes possédant de très nombreux paramètres, ils demandent un nombre très important de données afin d'être entraînés.

7. Christopher Alexander, *The Nature of Order*, Book 1 : *The Phenomenon of Life*, 2001 ; Book 2 : *The Process of Creating Life*, 2002 ; Book 3 : *A Vision of a Living World*, 2005, Center for Environmental Structure.

8. Nikos Salingaros et Kenneth Masden, « The science of intelligent architecture », *Teka Komisji Urbanistyki i Architektury Pan Oddział w Krakowie*, 2017, p. 95-105. <https://patterns.architecturez.net/doc/az-cf-193135> (site consulté le 25 juillet 2024).



Exemple de génération structurelle (à gauche, StyleGAN3), puis interprétative (à droite, KREA : <https://www.krea.ai>).

d'images choisies par l'utilisateur, avec ses préférences (style, structure, environnement, type de rendu).

Notre concept conjugue deux approches complémentaires : l'une structuraliste, exploitant la richesse d'un GAN (*Generative adversarial network*)<sup>9</sup> (ill. ci-dessus, à gauche), et l'autre interprétative (traitant des échelles de détail) (ill. ci-dessus, à droite). La capacité générative est illustrée sur un jeu de données de 4 300 images, avec une semaine pour l'entraînement du modèle. L'exploration des espaces latents des GAN révèle une approche structuraliste capable de produire une richesse de représentations dépassant – en génération intuitive – les limites du paradigme paramétrique. L'étude approfondie de ces espaces, effectuée sur des données plus étoffées, pourrait révéler des structures archétypales inédites.

### L'IA prédictive pour l'évaluation environnementale avec l'équipe MAP-MAACC

Les architectes, confrontés aux exigences environnementales, sont amenés à utiliser des outils de simulation pour évaluer la qualité de leurs projets, notamment lors des phases en amont où ils sont peu épaulés par des bureaux d'études. Toutefois, les temps de calculs nécessaires pour réaliser ces simulations rendent ces outils inutilisables dans beaucoup de situations, comme lors de concours.

Le MAP-MAACC développe des modèles d'IA prédictive pour estimer dans un temps court des valeurs de performances d'un bâtiment (consommation, éclairage naturel, radiation solaire) à partir de paramètres géométriques et énergétiques. Une fois entraînés sur une quantité suffisante de données, ces modèles sont pertinents dans la phase d'optimisation d'un processus de design génératif amené à évaluer des milliers de solutions. Une possibilité consiste à prédire des images de visualisation des résultats en utilisant une *Generative adversarial network* (GAN), notamment pix2pix<sup>10</sup>, entraîné sur de multiples paires d'images plan/simulation.



Paire d'images pour l'entraînement d'une IA prédictive : analyse de la radiation solaire, thèse CIFRE.

© Claire Duclos-Prévet/Architecture studio

### La cartographie des usages de l'IA en architecture avec l'équipe MAP-CRAI

Un travail exploratoire est en cours au MAP-CRAI : réalisé par Hinana Kaddour Darwich dans le cadre de son stage de master DNA (design numérique architecture)<sup>11</sup>, il consiste à cartographier des applications IA disponibles pour les architectes. Dans un premier temps, des concepts jugés pertinents pour classer ces IA ont été identifiés (type d'IA, type de tâche, phase de projet, données manipulées, niveau d'intégration de l'application IA dans des logiciels couramment utilisés en architecture) pour créer un cadre conceptuel. Plus d'une centaine d'IA ont ensuite été classées en utilisant ce cadre. L'analyse et la comparaison de ces applications sont en cours et devraient permettre de dresser des premières tendances et potentiels concernant le positionnement des IA commerciales pour l'architecture.

### Conclusion

La thématique de l'IA pour l'architecture est donc explorée à l'URM-MAP sous différents angles. Les approches co-évolutionnaires entre un système génératif et un architecte font partie des problématiques de la conception désormais favorisées par l'IA. Au-delà de la recherche de solutions architecturales à partir d'esquisses, d'intentions ou d'objets flous, des expérimentations sont poursuivies pour ajuster les manières dont l'IA interagit avec un projet architectural et ses multiples environnements. Le champ de recherche sur cette thématique est immense. ■

9. StyleGAN3 : Tero Karras *et al.*, « Alias-free generative adversarial networks », *Advances in Neural Information Processing Systems*, n° 34, 2021. <https://arxiv.org/abs/2106.12423v1> (site consulté le 25 juillet 2024).

10. Phillip Isola *et al.*, « Image-to-image translation with conditional adversarial networks », *arXiv*, 2017.

<https://arxiv.org/abs/1611.07004> (site consulté le 25 juillet 2024).

11. Master Design numérique architecture de l'Université de Lorraine et de l'ENSA de Nancy, valorisant le lien entre la recherche et l'enseignement : <https://www.nancy.archi.fr/fr/parcoursdna.html> (site consulté le 25 juillet 2024).



La ville à l'heure du changement climatique – termitière.  
© ENSA Nantes – UET Algoarchi

# Exploration de l'intelligence artificielle générative<sup>1</sup> dans la pédagogie en architecture

Les récentes avancées dans le paysage technologique suggèrent une modalité différente non seulement dans la conception mais aussi dans les pratiques d'enseignement. La récente démocratisation des grands modèles de langage (LLM)<sup>2</sup> combinée à l'utilisation généralisée d'outils génératifs *open source* (« ressources libres ») a largement ouvert la porte du territoire encore inexploré de l'intelligence artificielle dans la conception et l'apprentissage du projet architectural et urbain.

## RIMA AYOUBI

Doctorante UMR CNRS Ambiances architectures urbanités – Centre de recherche nantais architectures urbanités (AAU-CRENAU)

## LAURENT LESCOPI

Professeur École nationale supérieure d'architecture de Nantes (ENSA Nantes), chercheur UMR CNRS AAU-CRENAU

## ARPI MANGASARYAN

Doctorante UMR CNRS AAU-CRENAU

Le 30 novembre 2022, l'Intelligence artificielle (IA) enflamme l'actualité avec la mise à la disposition du grand public du robot conversationnel ChatGPT. En cinq jours à peine, un record absolu dans le monde du numérique, un million d'abonnés testent les compétences de ce Thot contemporain cherchant à en connaître les talents et les limites tout en se demandant s'il possède une âme. Les plus sceptiques déterminent,

du fait de nombreuses erreurs et hallucinations<sup>3</sup> du début, que le robot a le niveau d'un élève moyen, tandis que les plus enthousiastes voient là une façon disruptive de travailler. Ainsi, l'émergence de cette IA insatiable crée une série d'interrogations sur notre place dans la société, la valeur et l'avenir de notre profession, la nature de l'intelligence humaine, la fiabilité et la fiabilisation de l'information.

Dans le même élan, les moteurs de génération d'images<sup>4</sup> tels que Midjourney, Stable Diffusion et Dall-e, mis à disposition pratiquement dans la même temporalité, font à l'image ce que ChatGPT avait fait au texte.

Des possibilités nouvelles, étonnantes, rapides sont désormais accessibles au plus grand nombre, chacun pouvant se rêver Picasso, Monet ou Möbius,

1. Type de système d'intelligence artificielle capable de générer du texte, des images ou d'autres médias en réponse à des « invites » (*prompts*).

2. Forme d'intelligence artificielle conçue pour comprendre et générer du langage naturel, similaire à la manière dont les humains communiquent.

3. Réponse fautive ou trompeuse présentée comme un fait certain.

4. Outil qui utilise l'intelligence artificielle pour transformer les mots en illustrations.

poussant les artistes graphiques à réagir sur la nature d'œuvres « originales » dont le processus de création est l'absorption et la restitution par pixels d'un nombre incalculable de références déjà existantes.

### Quoi enseigner et comment enseigner ?

Il nous a paru déterminant de présenter le plus tôt possible les enjeux de l'IA à nos étudiants et de construire, progressivement, de nouvelles formes pédagogiques intégrant les enjeux, les contraintes et les promesses que peuvent contenir les IA, dans toute leur diversité.

Dans les milieux académiques, les robots conversationnels ont été les plus suspectés de dégrader la réflexion et la production des étudiants et le recours à

ChatGPT a été assimilé à du plagiat. D'ailleurs, l'outil de vérification de l'originalité des textes de l'établissement a relativement rapidement intégré un module pour détecter les textes produits par IA.

De notre côté, nous avons préféré travailler avec les étudiants sur la vérification des données et des réponses du robot et observer comment la langue, la syntaxe, l'expression pouvaient être améliorées et enrichies pour le plus grand confort des enseignants chargés de relire les textes. Les robots conversationnels nous invitent ainsi, du point de vue méthodologique, à faire séquencer et caractériser la construction d'un argumentaire, la recherche et la validation des références et la rédaction d'un texte plus fluide. Le processus devient aussi important que le résultat final.

La ville à l'heure  
du changement climatique –  
aménagement de la carrière.



© EnsaNantes – UET Algoarchi



© Ensa Nantes – UET Algoarchi

La ville à l'heure du changement climatique – installation, le glacier disparu.

Nous notons que cette aide linguistique est aussi une aide précieuse pour nos étudiants étrangers ou peu à l'aise dans la rédaction... et si le présent texte vous paraît mal écrit, nous devons assumer que nous n'avons pas utilisé d'IA pour relire notre proposition !

### L'IA peut-elle imaginer ?

La recherche formelle en architecture passe par l'image et les esquisses qui sont un jeu de formulation d'hypothèses par le croquis. Une forme de sérendipité est recherchée pour faire émerger de l'accident graphique de nouvelles inspirations.

La construction d'une image utilisant la méthode du texte-vers-image passe par un chemin différent et est assez semblable à celle d'une expérience de photographie artistique. Nous savons précisément ce que nous souhaitons obtenir, nous savons comment y parvenir et comment créer les conditions pour y parvenir, mais en même temps, nous souhaitons être surpris, dépassés par ce que nous allons obtenir.

Avec le texte-vers-image, c'est la même chose. Le *prompt* (l'« instruction ») contient ce que nous souhaitons voir émerger, mais nous souhaitons que l'image proposée transcende notre demande et dépasse nos attentes. Avec les étudiants, l'art du *prompt* est aussi une façon de travailler sur le vocabulaire, sur la



La ville à l'heure du changement climatique – cultiver en sous-sol.

© Ensa Nantes – UET Algoarchi



© Ensa Nantes – UET Algoarchi

La ville à l'heure du changement climatique – ville palimpseste.

qualité de la description, sur la hiérarchie des idées et sur la mobilisation des références. Le texte-vers-image nous a permis de montrer que le vocabulaire n'était jamais assez précis pour décrire le projet, que l'IA n'en était que le révélateur.

En termes méthodologiques et pédagogiques, nous avons monitoré le nombre d'images produites lors d'un projet et enregistré la courbe de satisfaction.

Pour cela, nous enregistrons le nombre de tentatives (valeur T), nous identifions le point de convergence entre les intentions déclarées au départ et le résultat obtenu (valeur R). Nous demandons d'établir un score entre 1 et 5 qualifiant la réponse obtenue (valeur S).

Ainsi, une image jugée valide pour la progression de la recherche sera accompagnée d'une indication R/T ::S. Par exemple 74/128 ::4, signifie qu'il y a eu 128 images testées, que c'est la 74<sup>e</sup> qui aura été la plus satisfaisante et que le taux de satisfaction est de 4 sur 5. À cette étape, si une nouvelle série doit être engagée, nous invitons à analyser les raisons de la réorientation du *prompt* et les modifications opérées pour atteindre la nouvelle itération.

Pour le moment, la grande contrainte est de pouvoir effectuer de fines modifications, ce qui est la nature même du travail de conception. Les techniques

actuelles manquent encore de souplesses pour cela. Toutefois, des outils spécifiques<sup>5</sup> donnent la possibilité de retoucher localement l'image ou d'en repeindre une partie seulement avec l'aide d'un *prompt*.

### L'apprentissage de la conception assistée par l'IA

En pédagogie, comme dans l'exercice professionnel d'ailleurs, l'abondance rapide, facile et de qualité peut rendre plus difficile le fait de suivre une ligne de conception. La multiplication des choix peut égarer, troubler. Nous observons également la complexité à franchir le passage entre l'image proposée et ce qui doit devenir la proposition finale, autrement dit le passage du concept au projet. En studio, nous avons noté de grandes difficultés à transcrire en volumes une image dont la richesse et les subtilités peuvent réclamer un très haut niveau technique graphique. Mais les évolutions techniques à venir devraient résoudre une partie de ce problème.

L'automatisation de certaines tâches de conception, bien qu'ayant plus d'impact pour l'avenir de la profession, est moins décrite que l'usage de l'IA pour le projet. Elle concerne d'une part l'optimisation de l'organisation spatiale en fonction de contraintes formelles, budgétaires et techniques, d'autre part

5. Automatic1111 avec les fonctions Canni et l'Inpainting, interface graphique (GUI) pour le modèle d'apprentissage Stable Diffusion.

l'optimisation des volumes construits en fonction de contraintes climatiques, pour une meilleure réponse environnementale.

La continuité des techniques de conception à l'aide d'algorithmes vers l'IA est naturelle pour qui possède déjà cette expertise : dans les agences, les BIM (*Building information modeling* ou « modélisation des données d'une construction ») managers ou les spécialistes de l'outil de programmation visuelle Grasshopper<sup>6</sup> préparent cette transition.

Du point de vue pédagogique, il s'agit de passer d'un processus de mise au point progressif d'une hypothèse à la gestion d'un très grand nombre de solutions concurrentes parmi lesquelles il faudra choisir. Ces solutions auront intégré dès l'origine les contraintes climatiques comme le soleil, la lumière naturelle, les nuisances sonores et le vent, autant de phénomènes ayant un impact sur le bien-être, l'environnement et la consommation énergétique du bâtiment. L'approche climatique est corrélée avec les contraintes programmatiques, l'organisation des espaces et leur fonction, la fluidité des circulations et la recherche de matériaux adaptés au contexte.

### La nécessaire sensibilisation des architectes de demain à l'environnement...

Dans un environnement pédagogique où la surabondance d'informations devient un enjeu référentiel et où une quasi-infinité d'hypothèses peut être produite, la focalisation sur la technique et sur les références devient un enjeu majeur.

La technique doit parvenir à singulariser les intentions de projets et non pas à suivre des schèmes préexistants, les références doivent alimenter les applications de données pertinentes. L'enjeu est donc bien de savoir interpréter correctement les résultats et de faire des choix argumentés par les solutions disponibles.

Il est très probable que, prochainement, les images ou les 3D issues d'IA porteront plus de détails sémantiques. Une porte sera reconnue comme une porte, une poutre comme une poutre, du bois comme du bois. Les modifications seront donc plus faciles puisqu'il sera possible d'agir à loisir sur le plan esthétique et sur le plan technique.

Gageons toutefois que ce sont surtout les approches climatiques qui seront facilitées afin de produire une architecture plus localisée, contextualisée, respectueuse de l'environnement... et là, il y a une vraie urgence. ■

6. Grasshopper est un environnement de programmation par blocs logiques, il permet de créer des formes complexes et paramétriques.

### Bibliographie

Imdat As et Prithwish Basu, *The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture*, Routledge, 2021.

Laurent Catala, « L'IA réalise en accéléré des tâches fastidieuses et laisse davantage de temps à la réflexion, à l'exploration et à la prise de décision », entretien avec Laurent Lescop, architecte et enseignant-chercheur, *AMC*, n° 320, 29 février 2024. <https://www.amc-archi.com/article/l-ia-realise-en-accelere-des-taches-fastidieuses-et-laisse-davantage-de-temps-a-la-reflexion-a-l-exploration-et-a-la-prise-de-decision-entretien-avec-laurent-lescop-architecte-ens.93808> (site consulté le 19 juin 2024).

Stanislas Chaillou, *L'intelligence artificielle au service de l'architecture*, Le Moniteur, 2021.

Jean-Philippe Defawe, « Formation : expérimenter pour maîtriser "la bête" », *Le Moniteur*, n° 6291, 2024. [https://www.lemoniteur.fr/article/formation-experimenter-pour-maitriser-la-bete.2325804?trk=public\\_post\\_comment-text](https://www.lemoniteur.fr/article/formation-experimenter-pour-maitriser-la-bete.2325804?trk=public_post_comment-text) (page consultée le 16 juin 2024).

Mathias del Campo, *Diffusions in Architecture: Artificial Intelligence and Image Generators*, John Wiley & Sons, 2024.

Mathias del Campo, *Artificial Intelligence in Architecture*, John Wiley & Sons, 2024.

Neil Leach, *Architecture in the Age of Artificial Intelligence: An Introduction to AI for Architects*, Bloomsbury Visual Arts, 2021.

Arpi Mangasaryan et Aida Siala, « Acte créatif de l'IA », *DNArchi*, n° 3, 2023. <https://dnarchi.fr/experimentations/acte-creatif-de-lia/> (site consulté le 16 juin 2024).

La ville à l'heure du changement climatique – sous-élévation de la ville.



# L'IA, un enjeu pédagogique pour les écoles d'architecture

Les enjeux pédagogiques et institutionnels de l'intégration des outils de l'IA dans les Écoles nationales supérieures d'architecture (ENSA) sont nombreux. Les méthodes de la pédagogie en architecture sont en pleine évolution. Enseigner l'usage d'un logiciel ne requiert désormais plus uniquement la connaissance de boîtes de dialogues accessibles *via* un clic droit sur un ordinateur...

## Une question de sémantique

Rappelons tout d'abord les grands principes de l'intelligence artificielle, tels qu'ils sont décrits par le professeur d'ingénierie informatique Ethem Alpaydin<sup>1</sup> :

- classification, capacité de l'Intelligence artificielle (IA) à organiser et à indexer des masses de données importantes dépassant largement les capacités de l'analyse humaine ;
- régression, capacité d'un algorithme à quantifier ou à qualifier une donnée selon une loi déterminée (linéaire, conique, cubique) relativement à un corpus connu ;
- supervision humaine<sup>2</sup>, processus de régulation de faux positifs ou faux négatifs par un humain.

Les capacités offertes par les outils d'IA aujourd'hui disponibles grâce à un simple *prompt* (« instruction ») convoquent une connaissance et une épistémologie très différentes de ce que nous avons à l'œuvre ces dernières années dans nos établissements d'enseignement et de recherche.

La sémantique et l'expertise humaine augmentées par l'IA vont dépasser la technique en superposant une connaissance approfondie du sens adossée à des références littéraires notamment.

Les processus de classification, de régression et de supervision humaine imposent la refonte des maquettes pédagogiques déployées aujourd'hui dans les ENSA (Paris Val-de-Seine, Nantes, Nancy, Lyon et Grenoble ont initié des formations de *prompt engineering*).

Ainsi, face à l'émergence du *prompt engineering*, l'enseignement de l'histoire de l'architecture peut prendre un appui tout à fait efficace et pertinent sur les connaissances décrites en particulier par des ouvrages tels qu'*Architecture, méthode et vocabulaire* de Jean-Marie Pérouse de Montclos (Éditions du patrimoine,

1972). Concernant la stéréophotogrammétrie, l'un des enjeux consiste en la qualification sémantique d'un nuage de points, par exemple « ceci est une lucarne »<sup>3</sup>.

De même, la connaissance des spécifications techniques inscrites dans les « Documents techniques unifiés » (DTU) devrait très efficacement pouvoir instruire, à terme, un réseau de neurones afin d'émettre, en phase de conception et d'esquisse et à l'intention de l'architecte, un ensemble d'alertes lui indiquant qu'il sort de la réglementation technique en vigueur.

Le matériel décrit par Christopher Alexander<sup>4</sup> constitue pour la conception spatiale un ensemble de références précieuses, quitte à ce qu'il soit interprété par un logiciel de conception 3D, formant un ensemble théorique, voire canonique, porté à la disposition des futurs étudiants et chercheurs en architecture.

De plus, l'interprétation sous forme de *prompts* de matériaux textuels comme *Les villes invisibles* d'Italo Calvino (Seuil, 1974) assurerait un matériel précieux pour aborder et élaborer un appareil critique dans le champ de l'urbain, du paysage et de l'architecture, à toutes les échelles.

Les écoles d'architecture apprenaient jusqu'alors aux étudiants à dessiner, il va falloir plus que jamais leur apprendre à écrire et à acquérir une culture de la sémantique de l'architecture associée à un esprit critique.

À terme, la transposition et la capacité à tirer un bilan de l'empreinte environnementale d'un projet d'architecture constituent un élément d'appréciation décisif à la maîtrise d'ouvrage et *in fine* à la société. Sur ce sujet, également, l'IA devrait être un outil fort utile.

Au-delà des biais techniques et des fantasmes liés à l'émergence de l'IA, la prise en compte des biais humains, opportunistes, technologiques ainsi que des biais du marché et la mise en place des aménités

## PASCAL TERRACOL

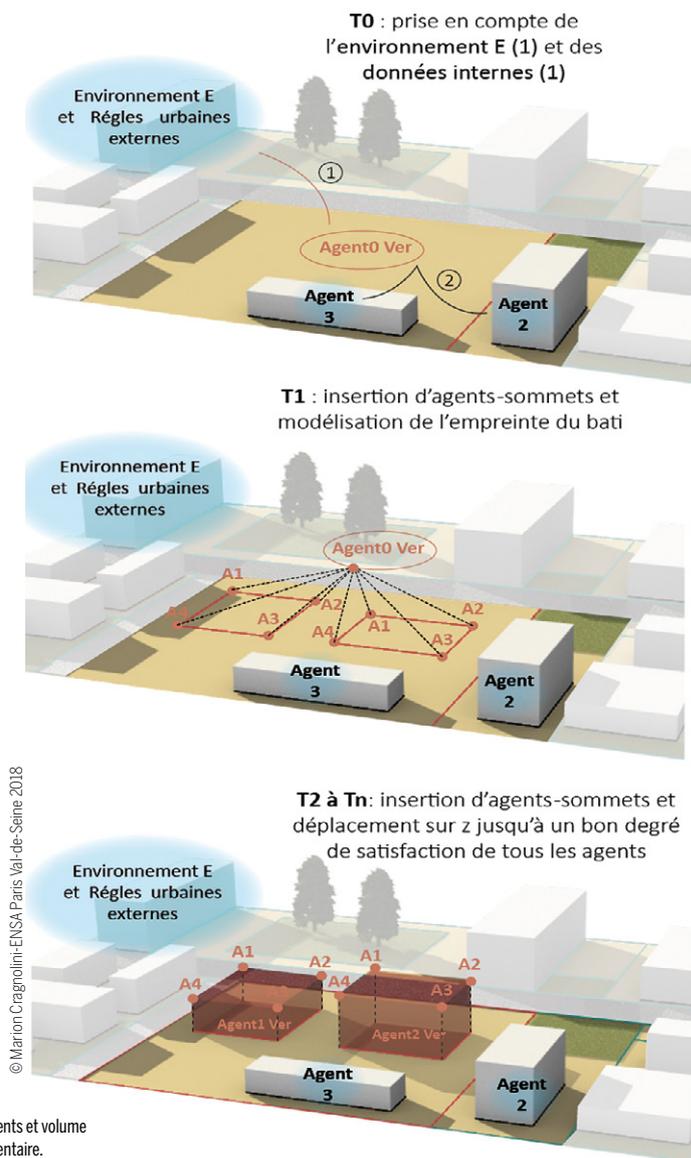
Professeur émérite sciences et techniques pour l'architecture, outils mathématiques et informatiques, HdR, Directeur scientifique de la chaire Architecture et intelligences, École nationale supérieure d'architecture de Paris Val-de-Seine (ENSA Paris Val-de-Seine), laboratoire Environnements numériques, cultures architecturales et urbaines (EVCAU)

1. Ethem Alpaydin, *Machine Learning: The New AI*, MIT Press, 2016.

2. La supervision humaine peut s'apparenter à ce qui se pratique dans le domaine de la santé *via* les réunions de concertation pluridisciplinaire (RCP).

3. Pascal Terracol, *Le bruit et le modèle. Stratégies d'identification d'éléments discrets*, Laboratoire EVCAU, 2020. <https://hal.science/hal-02938504> (site consulté le 11 juillet 2024).

4. Christopher Alexander, Sara Ishikawa et Murray Silverstein *A Pattern Language*, Oxford University Press, 1977.



Système multi-agents et volume englobant réglementaire. Marion Craognolini décrit le concept de volume englobant réglementaire comme un système multi-agents capable de dialoguer entre la connaissance de la réglementation urbaine et du programme architectural dont le résultat est un volume englobant porté à la disposition des acteurs du projet.

respectives du savoir (humaines, technologiques et économiques) génèrent une matrice d'analyse critique articulant données et réseaux de neurones avec le système d'acteurs de la maîtrise d'ouvrage publique et privée.

De ce point de vue, la thèse d'Elena Maj<sup>5</sup> sur la qualité et le numérique dans la maîtrise d'ouvrage publique devrait apporter un éclairage précieux.

Un autre axe de recherche explore la prédiction des sinistres. C'est l'objet de la thèse de Vincent Dubois<sup>6</sup> avec AQC (Agence Qualité Construction), travail de recherche encadré au laboratoire EVCAU<sup>7</sup>. Il s'agira

là, à terme, du déploiement d'un prototype permettant de qualifier le risque assurantiel d'un projet *via* un système d'alertes réglementaires.

Les outils de l'IA appliqués au projet d'architecture constituent ainsi un levier, véritable ensemble cumulatif de connaissances à transmettre aux futurs architectes. Si ces technologies nourrissent les craintes des praticiens, il est certain que l'enjeu de la formation et de la recherche est de permettre aux futures générations d'architectes de mettre en œuvre ces outils en émergence. Il s'agit bien là du rôle des écoles d'architecture et c'est la voie qui a été ouverte par la chaire « Architecture & Intelligences » qui accueillait les 2<sup>e</sup> rencontres architecture et intelligences dès 2021.

### D'une épistémologie de la classification...

L'usage des outils de génération d'images comme Dall-e, pratiqué dans certaines écoles nationales supérieures d'architecture, se résume à un processus d'apprentissage d'un ensemble d'outils dont la maîtrise se rapproche de ce que Stéphane Mallat a nommé dès 2017 « la malédiction de la complexité » ou encore « la malédiction de la grande dimension<sup>8</sup> ».

Au-delà de l'aspect théorique de la nécessité de réduction en dimension d'un processus d'analyse, cela se traduit par le *prompt engineering*<sup>9</sup>, qui impose tout de même la nécessaire maîtrise d'une sémantique, ici le vocabulaire de l'architecture pouvant éventuellement s'affranchir des contraintes du multilinguisme.

En résumé, il est illusoire de vouloir se représenter la complexité de l'organisation des données dans un réseau de neurones, de la même manière que la complexité des neurones d'un cerveau humain semble difficilement accessible, si ce n'est par l'interprétation de l'imagerie médicale ou encore par l'interprétation symbolique, objet de la psychanalyse. Qu'à cela ne tienne, les outils sont présents et disponibles et quitte à produire des chimères qui ont, à tout le moins, l'avantage de l'affichage ou de l'émergence d'une esthétique « à la Pierre et Gilles », il faut malgré tout se résoudre dans la formulation de *prompts* par des étudiants à un abandon, certes déroutant, du déterminisme du code, au profit d'une forme d'empirisme avec lequel il va falloir composer d'une manière bien assumée.

Mais alors que le déterminisme cartésien rassurait, le flou sémantique de la formulation de *prompts* réalise une aventure qui replace l'écriture (là encore peu importe le choix de la langue) et la maîtrise du vocabulaire comme objet minimal voire essentiel et décisif de la composition.

Les outils de classification tels que les bibliothèques de langage Python NLTK<sup>10</sup> permettent de réaliser un travail de classification qui dépasse largement les capacités humaines ou d'un groupe d'experts humains. C'est à l'aide de cet outil que Vincent Dubois a réalisé, en amont de sa thèse, la classification des 64 043 Projets de fin d'étude (PFE), soutenus depuis 1971 dans les 20 ENSA, présents sur le portail ArchiRès<sup>11</sup>. Ce travail répondait alors à la question : « Quels sont les travaux et les thèmes des PFE délivrés dans les ENSA ? »

5. Elena Maj, *Le numérique et la qualité au service de la maîtrise d'ouvrage sociale. Évolution de la maîtrise d'ouvrage sociale, le numérique et la qualité dans l'Office public de l'habitat de Bagnolet*, Université Paris Cité, projet de thèse déposé en 2019.

6. Vincent Dubois, *Prédiction de sinistralité dans le bâtiment. Diminuer les risques de désordres par l'exploitation de données de sinistralité agrégées avec des données caractérisant les bâtiments et leur environnement*, Université Paris Cité, projet de thèse déposé en 2023.

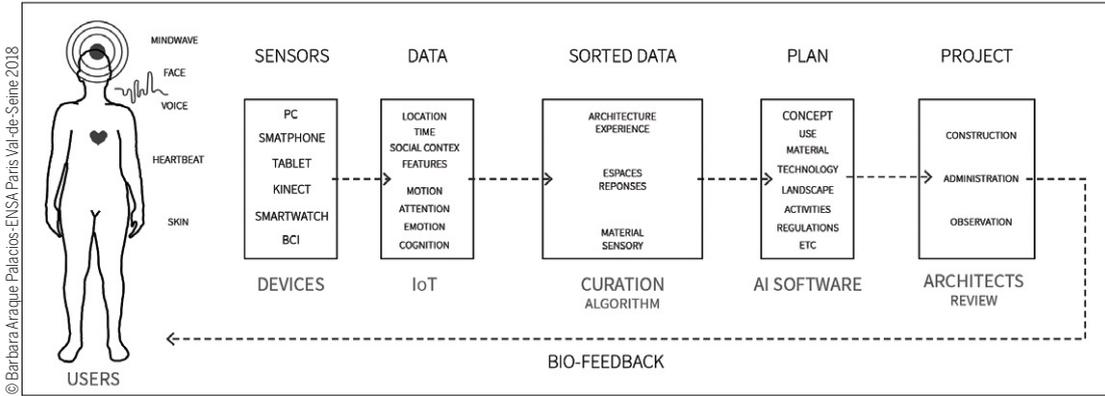
7. En contrat CIFRE (Convention industrielle de formation par la recherche).

8. Stéphane Mallat, *Compromis biais-complexité. L'apprentissage face à la malédiction de la grande dimension*, Collège de France, cours du mercredi 24 janvier 2018. <https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/cours/apprentissage-face-la-malediction-de-la-grande-dimension/compromis-biais-complexite> (site consulté le 11 juillet 2024).

9. Le *prompt engineering* récemment vulgarisé par ChatGPT consiste à générer des éléments tels que des images, ou des films grâce à des requêtes textuelles formulées auprès de modèles de traitement du langage naturel. Meta (Facebook) vient d'annoncer 3D AssetGen, un moteur pour la génération de ressources textuelles en 3D.

10. NLTK : *natural language toolkit* <https://www.nltk.org/> (site consulté le 11 juillet 2024).

11. <https://www.archires.archi.fr/>



*Dealing with émotions.* Dans le questionnement sur l'avenir de l'architecture, en tant qu'intersection des différentes connaissances techniques et artistiques, la vision sur la technique, les outils et les corps doivent se renouveler pour faire face aux nouveaux défis. Le défi est de comprendre l'interaction du monde physique avec le monde virtuel, pendant qu'on apprend à vivre parmi les humains, impliquant la matière, là où il y a une demande d'inclusion et d'identité spatiale. À quel point du processus ces changements peuvent-ils être entamés pour le bien-être humain dans leur environnement ? Peut-on revenir à une architecture créée avec le corps qui intègre maintenant d'autres corporéités et diversités mentales ?

De même, il serait précieux de classifier les fiches de postes de recrutement des enseignants-chercheurs de nos 20 ENSA, afin de répondre à la question : « Qui recrute-t-on dans les ENSA afin de former les futurs architectes ? »

Il serait également judicieux de classifier les fiches pédagogiques des enseignements déployés dans les cursus LMD (Licence/master/doctorat) de nos établissements, afin de répondre à la question : « Qu'enseigne-t-on en architecture en France ? »

En toute transparence, la classification des délibérations et des comptes rendus des instances des ENSA pourrait apporter également un éclairage sur la réception de la réforme des écoles de 2018<sup>12</sup> et, au-delà, apporter une qualification des écoles dépassant le seul signifiant de leur implantation géographique.

Enfin, la quantification du ratio [(nombre d'élèves × nombre d'enseignants)/nombre de conflits] permettrait d'identifier la bonne échelle d'une ENSA du point de vue de sa gouvernance optimale.

*In fine*, la classification des rapports du Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres) et des thèses soutenues dans les laboratoires des ENSA permettrait d'avoir une bonne visibilité de la recherche en architecture.

Sans vouloir être exhaustif *via* ces quelques propositions qui constituent une articulation entre intelligence biologique et intelligence numérique, l'usage et la présence dans les maquettes pédagogiques d'outils tels que Python et ses librairies ou la

plateforme d'hébergement et de gestion de logiciels Github constituent une étape décisive afin de former les futurs architectes capables de dépasser les paradigmes « vieille école », afin de répondre aux questions complexes posées à la société.

... à l'augmentation d'un regard critique

Enfin, l'un des enseignements de la thèse de Claire Dumas-Prévet<sup>13</sup> réside dans « la profusion de l'esquisse » qui repositionne et dépasse largement la capacité d'une équipe de concours dans la formulation de quelques esquisses à... plusieurs centaines. Cet élément convoque la capacité d'analyse décisive de la « supervision humaine » des futurs architectes comme objectif de la pédagogie des ENSA. ■

12. Décret n° 2018-109 du 15 février 2018 relatif aux écoles nationales supérieures d'architecture : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000036609053> (site consulté le 11 juillet 2024).

13. Claire Duclos-Prévet, *La modélisation des processus d'exploration numérique en architecture. Design génératif, performance et optimisation*, thèse de doctorat, HESAM, 2024. Voir les deux articles de Claire Duclos-Prévet, co-auteur, dans ce numéro : « Architecture et intelligence artificielle : quels enjeux ? », p. 68 ; « Potentialités de l'intelligence artificielle pour l'architecture : le laboratoire Modèles pour l'architecture et le patrimoine (MAP) », p. 72.

Bibliographie

Barbara Araque Palacios, *Architectures sensorielles : des données émotionnelles et l'espace conscient*, mémoire de master, ENSA Paris Val-de-Seine, 2021-2022.

Marion Cragnolini, *Système multi-agents et volume englobant réglementaire. Intelligence artificielle et processus de conception en architecture*, mémoire de master, ENSA Paris Val-de-Seine, 2018.

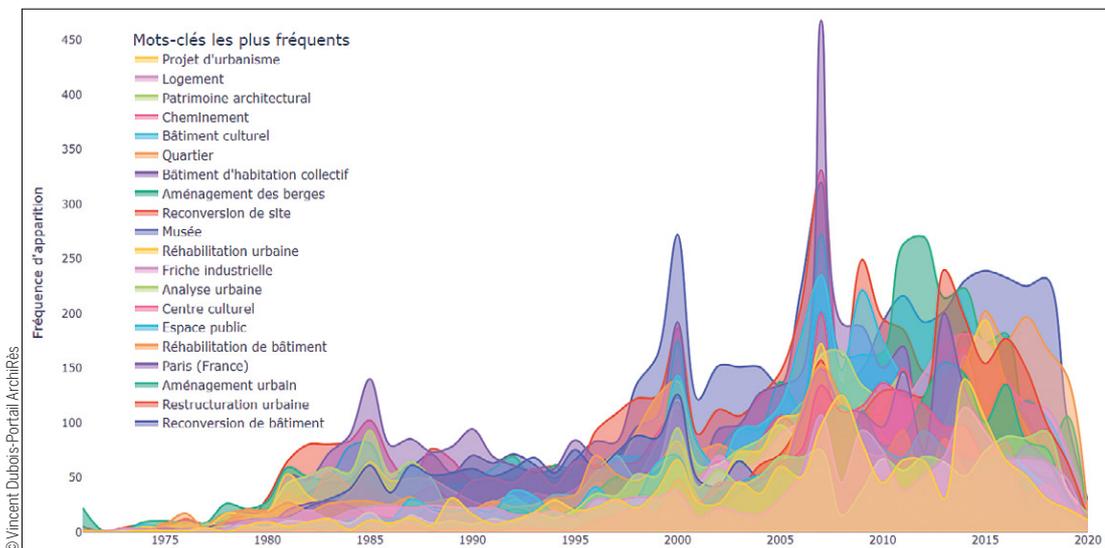
Vincent Dubois, *Exploiter l'Open Data avec PYTHON*, mémoire de master, ENSA Paris Val-de-Seine, 2021.

Claire Duclos-Prévet, *La modélisation des processus d'exploration numérique en architecture. Design génératif, performance et optimisation*, thèse de doctorat, HESAM, janvier 2024.

Jean-Marie Pérouse de Montclos, *Architecture. Méthode et*

*vocabulaire. Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France*, Éditions du patrimoine, 2000.

Pascal Terracol, *Vocabulaire de géométrie pour l'architecture. Ontologies pour modèles de synthèse*, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 2017, 288 p.



Classification des projets de fin d'études (PFE) délivrés depuis 1971 dans les ENSA.

# L'IA vecteur d'évolution des métiers et des compétences

L'architecture se réalise dans son contexte social, écologique, économique, technique, scientifique et culturel, elle est l'expression de ces conditions. Le développement récent des services d'Intelligence artificielle générative (IAG) a contribué à renforcer les réflexions autour de l'instrumentation du processus de conception et des modalités d'automatisation des productions et des représentations qui l'accompagnent.

## ABDELKADER BEN SACI

Maître de conférences, laboratoire Ambiances architectures urbanités – Centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain (AAU-CRESSON), ENSA de Grenoble, Université Grenoble Alpes

## PHILIPPE MARIN

Professeur, directeur du laboratoire Méthodes et histoire de l'architecture (MHA)/École nationale supérieure d'architecture (ENSA) de Grenoble, Université Grenoble Alpes

## DAVID WOLLE

Maître de conférences, laboratoire MHA, ENSA de Grenoble, Université Grenoble Alpes

Les exemples d'usage de ces techniques sont aujourd'hui nombreux, ils traitent de la génération d'images, de l'intégration de paramètres, variés et multiples, pour générer, évaluer et optimiser des solutions, ils illustrent des démarches d'analyse, de catégorisation et de traitement des données architecturales et urbaines, ils sont associés aussi bien aux phases initiales de la conception qu'aux activités plus opérationnelles d'exécution ou de construction. Ils peuvent adresser des enjeux économiques, écologiques ou culturels. Ces pratiques passent par l'implémentation de bibliothèques de codes au sein des environnements logiciels de conception, ou par l'activation des nouvelles fonctionnalités des logiciels, ou encore se réalisent en utilisant des services en ligne.

### Expérimenter, apprendre, imaginer et inventer

L'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble est membre du projet d'École française de l'intelligence artificielle (EFELIA)<sup>1</sup>, porté par l'Université Grenoble Alpes. Dans le cadre de cette initiative, différents modules pédagogiques sont proposés aux étudiants de l'établissement. À titre d'exemple, l'un des cours explore l'utilisation de la conception générative et montre comment cette approche permet aux architectes d'utiliser des données et des algorithmes pour créer des formes, pour résoudre des problèmes fonctionnels ou optimiser des solutions. Un autre introduit la définition de l'apprentissage machine, explicite les concepts, les techniques, les types et les conditions d'apprentissage automatique. Il envisage de transmettre les savoirs nécessaires et il discute les notions de modèle prédictif et de modèle génératif. Les étudiants expérimentent et appliquent ces techniques à des questions architecturales. Un troisième confronte les modalités de génération d'images à partir du texte

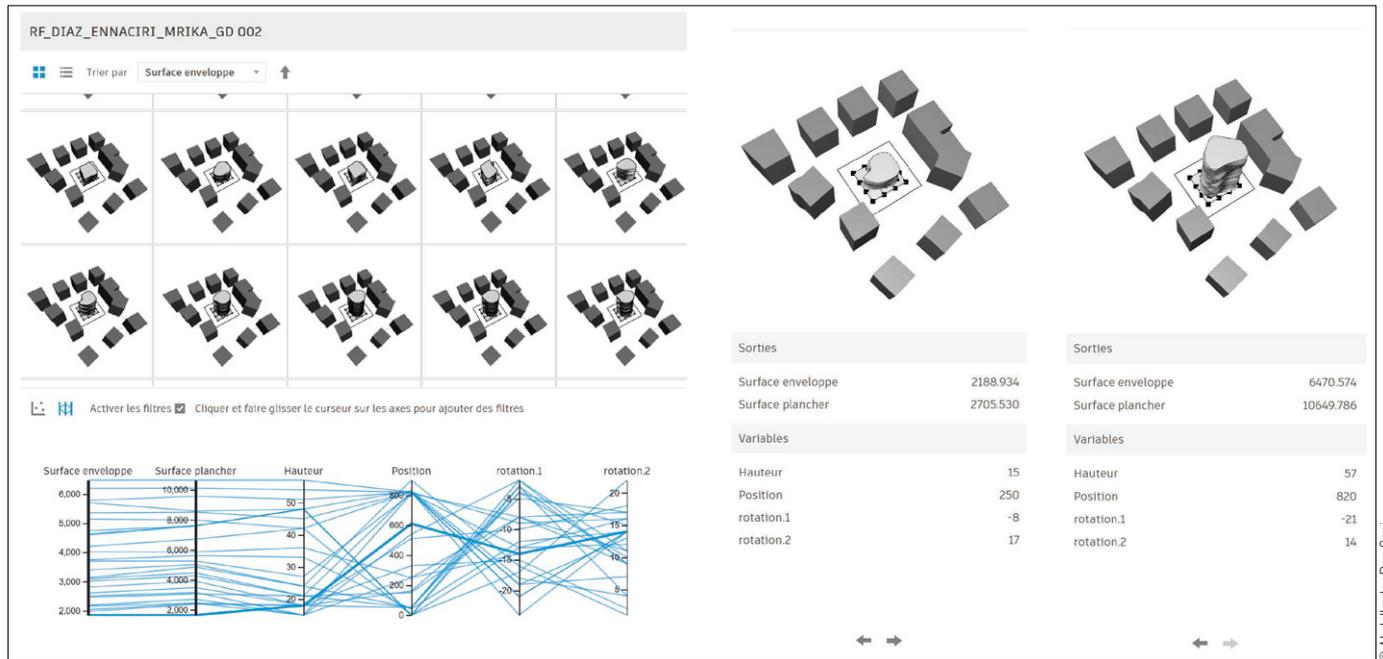
aux approches traditionnelles d'expression plastique et visuelle.

### L'IAG « texte-vers-image » renouvellet-elle les modalités d'expressions visuelles ?

Les outils de génération d'images modifient la production, la pratique et le rapport à l'image. Il est difficile de prédire si les effets de cette technique seront comparables à ceux de la photographie ; néanmoins, elle participe d'ores et déjà à une transformation des cultures visuelles et à un renouveau des principes esthétiques, elle fait rupture, instaurant un avant et un après.

La difficulté d'appréhender ces images est renforcée par une mécompréhension de leurs modes de production, mais aussi par un changement dans le processus de conception et de fabrication, s'appuyant désormais sur une expression verbale et sur une sémiologie spécifique. Se pose alors la question de la signification de ces images en matière de représentation, de trace, d'interprétation, d'imaginaire collectif, de matérialisation d'image mentale ou d'« imagination artificielle ». Il s'agit dès lors de considérer ces productions comme des objets culturels, de les situer dans l'histoire de l'art et des idées, mais aussi de penser la pratique de ces images et d'acquérir les compétences et les connaissances du fonctionnement et de l'utilisation de ces techniques. Analyser les IA avec un éclairage technique, artistique et philosophique permet de dissoudre un peu cet effet d'extrême nouveauté, de distinguer les questionnements traditionnels de l'émergence de nouveaux enjeux. C'est en créant ces liens, en percevant les linéaments, que nous aurons la possibilité d'intégrer les IA dans le champ de la pensée ou de la culture.

1. <https://miai.univ-grenoble-alpes.fr/education/efelia-miai-1400610.kjsp> (site consulté le 15 juillet 2024). Voir dans ce numéro le focus : Kim Thang Nguyen, « Institut interdisciplinaire et intelligence artificielle, activités de recherche, de formation et d'innovation », p. 86.



© Abdelkader Ben Saci

Exemple de rendu de cours de master sur la thématique de la conception générative.

### Limites et opportunités de l’IAG

Les IAG sont au cœur des enjeux sociaux, elles portent des opportunités et soulèvent des défis sociaux, économiques, environnementaux et culturels. Nous formulons ici quelques-uns des questionnements qui les accompagnent. En considérant le résultat des productions de l’IAG « texte-vers-image », chacun est frappé par sa décontextualisation. L’image est sans filiation ni attribution, elle est produite à la manière d’un faux-semblant sans réelle articulation stylistique ou théorique, ce qui rend difficile la production de connaissances fiables. Ces images instaurent la prédominance de l’interprétation. Il faut alors enrichir le processus de cycles et protocoles en envisageant par exemple des allers-retours de l’image vers le texte, puis du texte vers l’image, ou encore d’images vers l’image. La création exige souvent des processus « infra-verbaux », intuitifs et gestuels. À l’opposé, les IAG requièrent une formalisation verbale des intentions créatives, et si le concepteur n’est pas conscient et acteur dans la définition du système génératif, les savoir-faire risquent d’être remplacés par des idées pré-conçues, transformant la création en un travail essentiellement interprétatif. Il apparaît alors nécessaire d’envisager « l’explicitabilité située » des systèmes d’IA. Ils sont souvent perçus comme des « boîtes noires », rendant leurs fonctionnements opaques et difficiles à comprendre. Il est important de développer une IA de confiance, pour rendre les résultats compréhensibles et utilisables dans leur contexte d’usage.

Par ailleurs, les données d’entraînement des IAG sont préparées par des travailleurs invisibles et exploités, avec parfois une reproduction de points de vue conservateurs et d’inégalités sociales. Ces données sont souvent moissonnées sans respect des droits de propriété intellectuelle. La mise en œuvre des algorithmes accentue ces défauts, elle crée des bulles de filtre, un eugénisme culturel en effaçant la diversité des arts et des cultures, elle peut par ailleurs conduire

à une standardisation des productions. Il s’agit alors d’envisager la place des données culturelles françaises et européennes, ce que pourrait être un « *dataverse*<sup>2</sup> » de données architecturales et urbaines, en considérant les usages ainsi que la transformation des pratiques et des métiers. Cette IA culturelle devra être frugale. La fabrication des machines et périphériques nécessite des métaux rares, créant des tensions géopolitiques, l’empreinte énergétique et carbone des infrastructures et la production de déchets numériques posent des défis environnementaux majeurs. Ainsi, l’usage des systèmes d’IA devra intégrer ces contraintes et assurer le développement d’un numérique responsable.

### L’importance d’exercer la « subjectivité computationnelle » des concepteurs

Le script, l’algorithme ou la donnée constituent des matériaux pour éclairer un problème de conception, ils sont des moyens de compréhension, d’exploration, d’externalisation et de médiation. Ces techniques accompagnent la construction de connaissances, elles participent à la constitution de nos imaginaires. L’exercice d’une « subjectivité computationnelle critique et réflexive<sup>3</sup> » impose l’appropriation de certains aspects de la culture numérique. Elle devrait permettre d’envisager la signification des modèles et des données, des relations entre donnée, information, connaissance, modèle et simulation. Elle devrait entraîner à lire et à écrire du code.

Dans le champ de l’architecture, l’évolution de la profession et des pratiques au sein des agences ont fait l’objet de travaux qui ont permis d’identifier différentes figures de l’architecte, du super-utilisateur au super-spécialiste<sup>4</sup>. Ces postures impliquent des compétences qui vont de la construction simple de modèles, à l’aide de programmation visuelle, à une programmation expérimentée à l’aide de langages évolués.

2. Application web à code source ouvert, internationale et collaborative qui permet de partager, préserver, citer, explorer et analyser des données de recherche.

3. David M. Berry, « Subjectivités computationnelles », traduction Yves Citton et Antoine Masure, *Multitudes*, vol. 59, n° 2, 2015, p. 196-205. 10.3917/mult.059.0196

4. Aurélie de Boissieu, « Super-utilisateurs ou super-spécialistes ? Cartographie des catalyseurs de la transformation numérique en agence d’architecture », *Les Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère* (CRAUP), vol. 9, n° 10, 2020. <http://journals.openedition.org/craup/5551>; <https://doi.org/10.4000/craup.5551>; 10.4000/craup.5551 (site consulté le 12 juillet 2024).

### La nécessité d'assurer la « capacitation » des concepteurs

Il s'agit de se préserver des effets d'appauvrissement de l'automatisation et d'éviter de faire des concepteurs de simples consommateurs de services d'IA, pour favoriser des postures critiques et inventives, et rendre chacun acteur de son milieu technique. Il s'agit de permettre aux architectes de concevoir non seulement les

5. <https://anr.fr/en/france-2030/call-for-proposals-details/call/f6b65d72c5b875f28cf432b1391ac6ac/>  
(site consulté le 15 juillet 2024).

systèmes constructifs et sociaux de l'architecture, mais également les outils et les méthodes de la conception et de la construction.

L'apprentissage et la pratique des techniques numériques et d'IA transforment en retour les capacités réceptrices, ils permettent l'incorporation d'un savoir en activant la connaissance matérialisée dans l'instrument ou dans l'outil. Ces démarches, ces expérimentations critiques, aiguissent le regard, facilitent l'appropriation inventive et contribuent à penser les techniques. Il s'agit alors de mettre en place des pratiques et d'accompagner la transmission des savoirs qui permettent de comprendre et de pratiquer ces dispositifs techno-symboliques. Cette perspective s'envisage à travers l'acquisition de compétences théoriques et pratiques sur l'histoire de l'évolution des systèmes de connaissance, ainsi que sur la place des techniques numériques dans le domaine de l'architecture ; sur les principaux concepts mathématiques et informatiques ; sur les enjeux économiques, sociaux, culturels, idéologiques des SIA ; sur l'usage, la mise en œuvre et l'expérimentation de ces sciences et techniques.

Les enjeux associés à la transformation des métiers et des compétences font l'objet de travaux et un projet intitulé « Transitions Archi-Paysage » (construire un écosystème innovant en architecture et paysage par l'évolution des formations au prisme des transitions numérique et écologique) est en cours de constitution, soutenu par le programme « Compétences et métiers d'avenir, France 2030<sup>5</sup> ». Porté par l'ENSA de Normandie, il associe l'ensemble des Écoles nationales supérieures d'architecture et de paysage. ■

Exemple d'expérimentations de génération d'images à partir de texte. Mise en place d'un protocole d'écriture automatique, cours de master.

© Philippe Marin





Série d'images générées à partir d'un protocole allant de l'image au texte, puis du texte à l'image.  
Prompt utilisé : « white building with multiple domes standing upright, in the style of cubo-futurism, natural materials, 32k uhd » (« bâtiment blanc avec plusieurs dômes dressés, dans le style du cubo-futurisme, matériaux naturels, 32k uhd »).

# INSTITUT MULTIDISCIPLINAIRE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, ACTIVITÉS DE RECHERCHE, DE FORMATION ET D'INNOVATION

## KIM THANG NGUYEN

Professeur, directeur du volet éducation du *Multidisciplinary Institute in Artificial Intelligence (MIAI)*, Laboratoire d'informatique de Grenoble (LIG), École nationale supérieure d'informatique et de mathématiques appliquées (ENSIMAG) – Institut national polytechnique de Grenoble, Université Grenoble Alpes

1. *Multidisciplinary Institute in Artificial Intelligence (MIAI)*  
<https://miai.univ-grenoble-alpes.fr/>  
(site consulté le 15 juillet 2024).

L'Institut multidisciplinaire en intelligence artificielle Grenoble Alpes (MIAI)<sup>1</sup> a pour objectif de mener des recherches en intelligence artificielle au plus haut niveau, d'offrir des cours attrayants aux étudiants et aux professionnels de tous les niveaux, de soutenir l'innovation dans les grandes entreprises, les PME et les start-up, d'informer et d'interagir avec les citoyens sur tous les aspects de l'intelligence artificielle. S'appuyant sur la dynamique scientifique des instituts IA en France et sur son programme pédagogique EFELIA, MIAI repose sur un consortium élargi : Université Grenoble Alpes, Université Savoie-Mont Blanc, Université Clermont-Auvergne, Grenoble École de Management, CHU de Grenoble, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), CNRS, Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA), Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM). Ensemble, les part-

naires représentent une masse critique de 48 unités de recherche, avec plus de 500 personnels académiques dans les domaines cœur de l'IA et plus de 180 dans les principaux domaines d'application identifiés : environnement et énergie, santé, industrie 4.0, IA et éducation. Les atouts de l'institut MIAI proviennent de ses trois piliers : recherche, formation et innovation. En recherche, une forte dynamique est créée par MIAI avec plus de 30 % de la production de l'ensemble des centres IA français (pendant la période 2019-2023). Son profil scientifique porte non seulement sur la recherche fondamentale en apprentissage mais également sur les applications spécifiques avec l'importance des domaines « IA et société », « Environnement et énergie » et dans le domaine de la santé (IA pour/dans les neurosciences, IA pour les applications cliniques, Computer vision pour la médecine). En formation, avec l'ampleur et le succès du programme de formation

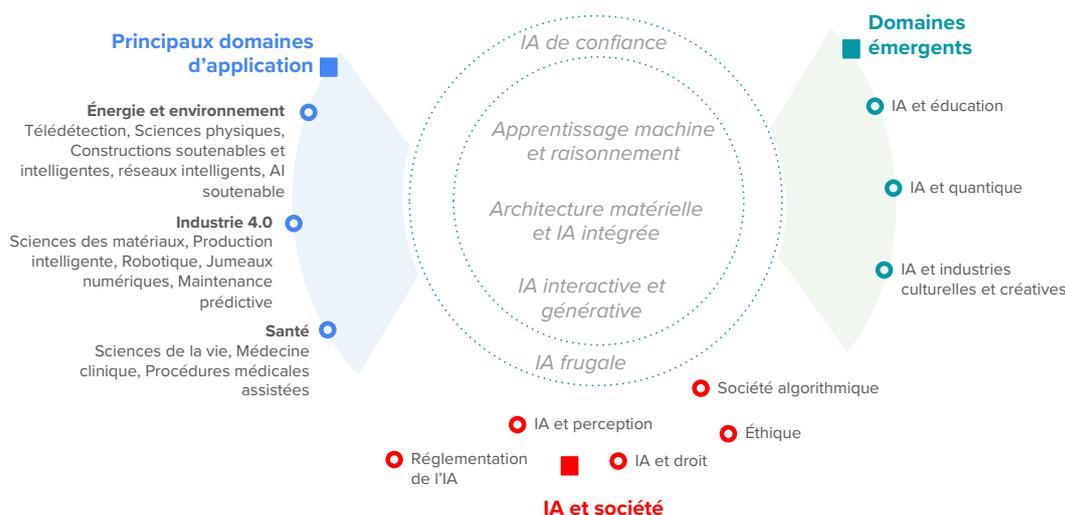
EFELIA MIAI, son objectif est de développer et d'accélérer les formations, la sensibilisation et l'acculturation en intelligence artificielle pour répondre aux besoins croissants de la recherche et de l'industrie en France. MIAI se concentre sur l'excellence de la formation à l'IA :

- en intégrant la formation à l'IA dans le cursus standard pour un large éventail de domaines disciplinaires ;
- en développant la formation à tous les niveaux et l'apprentissage tout au long de la vie (LLL) avec des programmes en ligne et interactifs.

L'intégration de la recherche et de l'innovation avec des partenaires industriels est un atout évident, qui a permis d'obtenir des résultats significatifs en matière de science et d'innovation et de densifier l'interface des collaborations. 82 % des chaires (2019-2023) bénéficient de collaborations industrielles, 23,50 M€ de cofinancements ont été obtenus (dont 12 M€ en cash), 13 start-up ont été créées et 9 sont en création, 2 laboratoires ont été montés en commun avec la société de télécommunications Orange et le groupe Constellium (recherche dans le domaine des alliages d'aluminium).

L'intelligence artificielle bouleverse le monde de la culture, comme beaucoup d'autres domaines, suscitant à la fois fascination et inquiétude. Dans ce contexte, MIAI lance des projets d'études de l'impact de l'IA sur la création, la production et les emplois et développe également des formations en lien avec la conception, la création, l'ingénierie et la construction, en collaboration par exemple avec l'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble (ENSAG). ■

Les domaines d'application « IA et société », les différents types d'IA et les problématiques émergentes.  
© MIAI



# Comment l'IA transforme l'analyse des images de la ville

Se promener en ville peut offrir des expériences variées : certaines rues paraissent vivantes et agréables, tandis que d'autres sont ennuyeuses, voire oppressantes. Les ambiances urbaines, liées en partie à l'aspect visuel de la ville, agissent sur la qualité de vie de ses habitants : c'est pourquoi qualifier la perception visuelle de l'espace urbain par le piéton est un enjeu pour les collectivités territoriales et les acteurs de l'urbanisme.

Comprendre comment les piétons perçoivent et interagissent avec leur environnement est primordial pour créer des espaces non seulement fonctionnels, mais aussi psychologiquement et socialement attrayants et stimulants pour les habitants. Grâce à l'Intelligence artificielle (IA), et notamment *via* des techniques de traitement d'image, de nouvelles méthodes émergent pour évaluer, de manière automatique, le ressenti des piétons dans n'importe quelle ville.

## Évaluer l'expérience du piéton

L'évaluation des qualités urbaines est généralement chronophage, car elle nécessite de réaliser des études *in situ* avec des experts et des enquêtes auprès d'habitants.

Pour pallier ce problème, nous travaillons sur des modèles d'IA permettant de qualifier automatiquement l'espace urbain à l'échelle d'une ville entière, à partir de corpus d'images de rues. L'objectif est de quantifier ces qualités subjectives pour « mesurer le non-mesurable<sup>1</sup> » et aider les experts dans leur prise de décision.

Tandis que les modèles classiques se basent sur des quantités mesurables comme la largeur d'une rue, la hauteur des bâtiments, le ratio de ciel vu, la présence de sites historiques ou la densité de végétation, la particularité des modèles d'IA est qu'ils sont entraînés directement à partir des ressentis des piétons.

L'IA permet en effet d'analyser des millions d'images prises au niveau de la rue et de les associer à des évaluations humaines, collectées *via* des questionnaires en ligne. Les images de rue sont présentées aux utilisateurs pour qu'ils se familiarisent avec le lieu de l'étude, puis ils évaluent les qualités du lieu, sur une échelle de 1 à 5 : sentiment de sécurité, caractère dynamique ou paisible, etc. Les chercheurs développent ainsi des modèles capables de prédire comment les piétons perçoivent différents espaces urbains.

En 2016, le MIT (Massachusetts Institute of Technology) a publié un jeu de données qui fait référence, nommé Place Pulse 2. Il contient 110 000 images provenant de 28 pays et plus de 1,5 million de votes d'utilisateurs du monde entier. Ce jeu de données offre un socle commun pour que les chercheurs puissent développer et évaluer de nouvelles techniques sur une grande variété d'environnements urbains<sup>2</sup>.

Les modèles d'IA utilisés sont des réseaux de neurones convolutionnels, qui sont tout particulièrement adaptés pour traiter des images. Une fois entraînés, ces modèles d'IA peuvent analyser de nouvelles images et prédire des indicateurs qui nous renseignent sur la manière dont les piétons sont susceptibles de percevoir ces lieux, au sens d'un comportement « moyen ».

À grande échelle, ces indicateurs permettent par exemple de créer une cartographie sensible de la ville. Cette approche peut aussi être utilisée pour prévoir les effets d'un nouvel élément de mobilier urbain ou pour évaluer l'avant et l'après d'un projet de rénovation d'un lieu public.

## Les avantages de l'IA pour l'analyse urbaine

L'utilisation de l'IA permet de traiter de grandes masses de données, ce qui présente plusieurs avantages significatifs : un échantillon beaucoup plus large et diversifié de personnes, capturant ainsi un vaste éventail de points de vue ; la possibilité d'évaluer rapidement des villes entières, fournissant une vue d'ensemble impossible à obtenir avec les méthodes d'enquête habituelles. De plus, nous pouvons nous concentrer sur les ressentis individuels des résidents et des utilisateurs réels des espaces, qui sont des données difficiles à traiter. Cela nous permet de compléter les évaluations plus classiques qui reposent sur des attributs physiques des lieux. En outre, elle aide à identifier des relations entre les éléments perçus et

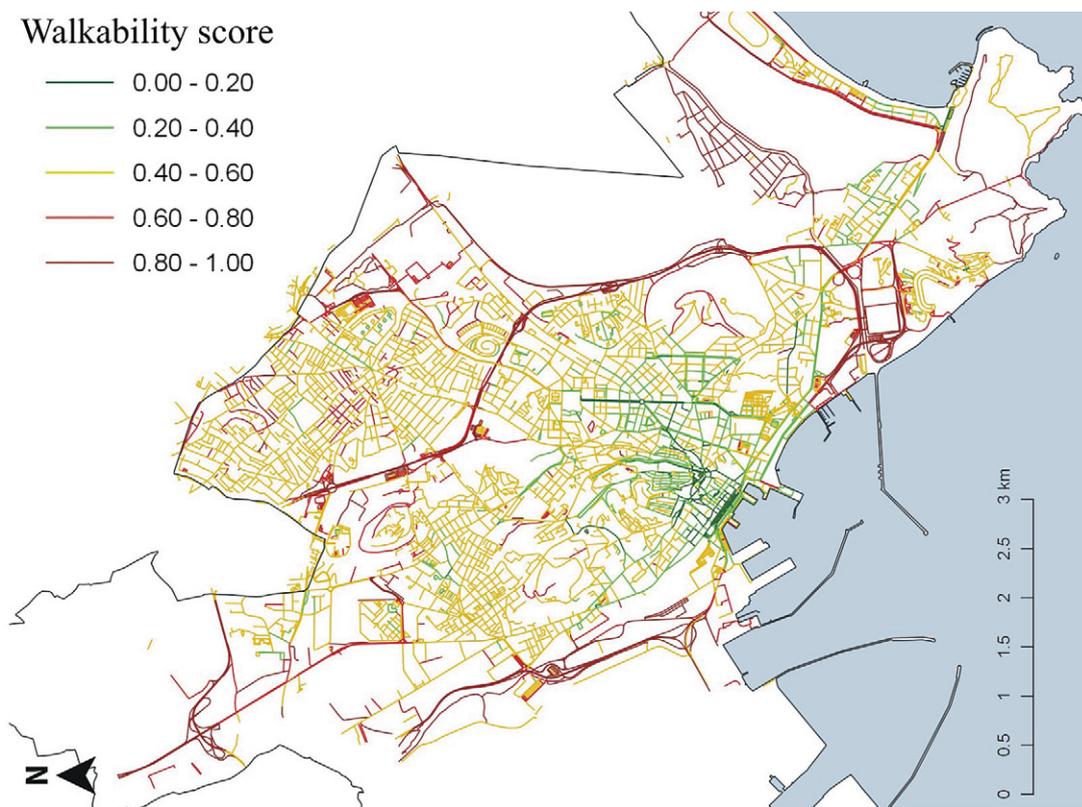
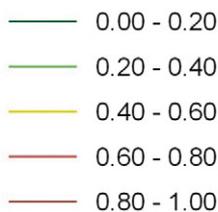
## BENJAMIN BEAUCAMP

Post-doctorant, ingénieur de recherche à l'Université Gustave Eiffel, chercheur associé UMR CNRS Ambiances Architectures Urbanités - Centre de recherche nantais architectures urbanités (AAU-CRENAU)

1. Reid Ewing et Susan Handy, « Measuring the unmeasurable: Urban design qualities related to walkability », *Journal of Urban Design*, vol. 14, n° 1, 2009, p. 65-84. <https://doi.org/10.1080/13574800802451155> (site consulté le 26 juillet 2024).

2. Abhimanyu Dubey, Nikhil Naik, Devi Parikh, Ramesh Raskar et César A. Hidalgo, « Deep learning the city: Quantifying urban perception at a global scale », dans Bastian Leibe *et al.* (dir.), *Computer Vision - ECCV 2016*, Springer, p. 196-212. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_12) (site consulté le 26 juillet 2024).

### Walkability score



Carte de marchabilité de la ville de Cagliari en Italie.

© Ivan Blečić, Arnaldo Cecchini et Giuseppe A. Trunfio, « Towards automatic assessment of perceived walkability », dans Osvaldo Gervasi et al. (dir.), *Computational Science and its Applications – ICCSA 2018*, Springer, 2018, 10962 LNCS, p. 351-365. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95168-3\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95168-3_24) (site consulté le 26 juillet 2024).

donne donc des explications qui pourraient échapper aux observateurs humains. Cette approche vise à démocratiser le processus d'évaluation, en intégrant l'expertise ordinaire d'un large éventail de citoyens grâce à des méthodes innovantes de collecte de données telles que le *crowdsourcing* (« collecte de données participatives »).

### Améliorer la représentation virtuelle des espaces urbains

Les chercheurs travaillent à l'amélioration de cette approche, notamment en se concentrant sur l'obtention de recommandations basées sur l'expérience des piétons, élément essentiel des approches d'apprentissage automatique.

Un facteur majeur pour obtenir des résultats fiables est de s'assurer que les images utilisées représentent fidèlement l'expérience des piétons. Les images de rue, largement utilisées en raison de leur couverture dense des villes, ont traditionnellement été produites par des plateformes offrant principalement des perspectives centrées sur les voitures. Cette utilisation

prépondérante de l'imagerie automobile peut fausser la représentation visuelle des espaces urbains, en particulier celles des piétons et des cyclistes. Par exemple, on peut observer un même lieu photographié depuis la route avec le point de vue d'un automobiliste et depuis le trottoir avec celui d'un piéton. Comme l'image est l'unique information communiquée aux participants sur le lieu, ce changement de perspective a un impact fort sur la manière dont il est évalué. Pour remédier à ce problème, les chercheurs peuvent utiliser des images produites directement par les piétons avec leur smartphone ou des caméras embarquées, afin de multiplier les points de vue. Des plateformes comme Mapillary<sup>3</sup> ou Panoramax<sup>4</sup> permettent le partage de ces images.

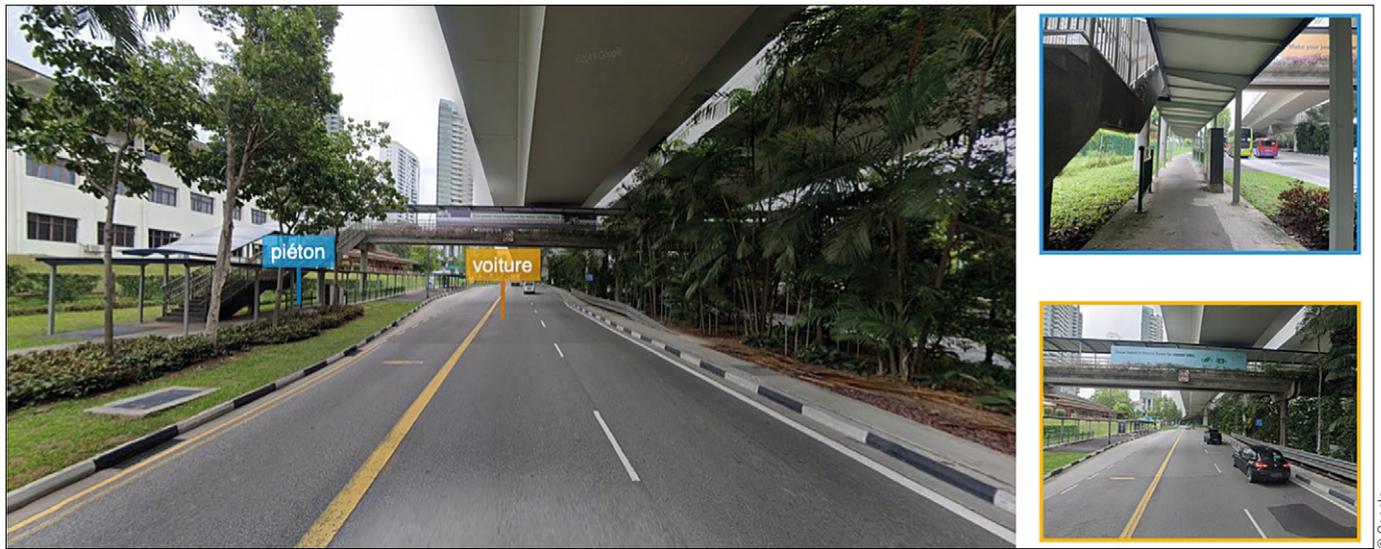
Un autre aspect influant sur notre capacité à nous projeter dans un lieu est l'utilisation d'images à 360 degrés. Comparées aux images « plates », ces images sont une manière de mieux appréhender l'espace urbain environnant et permettent aux participants de mieux comprendre l'espace. La figure ci-contre, en haut, montre l'évolution de la perception d'un lieu en fonction de la direction d'orientation de

3. <https://www.mapillary.com/> (site consulté le 26 juillet 2024).

4. <https://panoramax.fr> (site consulté le 26 juillet 2024).

Capture d'écran de la plateforme UP2 (*urban panoramic perception*), développée par les auteurs pour collecter l'avis de participants sur des images *Street View* plates ou à 360°.

© plateforme UP2 (*urban panoramic perception*)



© Google

la caméra. Le simple fait de regarder devant ou derrière soi peut amener à des expériences différentes. Cette nouvelle technique d'évaluation des espaces urbains devrait correspondre davantage à l'expérience humaine du lieu. Cela contribue à obtenir des données qui se rapprochent de l'expérience réelle du piéton, et qui sont donc plus fiables.

### Défis

Malgré le potentiel de cette approche, des questions demeurent. La collecte de données auprès d'un échantillon véritablement représentatif de la population reste un défi. Les enquêtes en ligne peuvent toucher rapidement de nombreux participants, mais elles risquent de ne pas saisir toute la diversité des résidents urbains, de leurs activités et de leurs expériences.

Par ailleurs, cette approche basée sur l'IA ne restitue pas tous les aspects de la perception urbaine, tels que le son, l'odeur et les souvenirs personnels qui jouent un rôle dans notre expérience des villes. Ainsi, les modèles d'IA visuels apportent une perspective qui doit être complétée avec d'autres méthodes d'analyse.

Enfin, les modèles basés sur l'IA sont souvent difficiles à expliquer. Bien que les réseaux puissent prédire les différentes qualités subjectives d'un lieu, il est difficile de comprendre pourquoi ce lieu possède ces qualités. Des approches complémentaires basées sur l'analyse du contenu visuel peuvent aider à corréliser des éléments tels que la présence de végétation, de voitures ou d'autres piétons, avec des qualités perceptuelles élevées ou faibles.

### Perspectives

Plusieurs pistes sont possibles pour la suite de ce travail. La priorité est de continuer à améliorer la qualité des données récoltées *via* les questionnaires en ligne. Cela doit se faire notamment en proposant des expériences virtuelles plus proches de l'expérience réelle, sur site. Par exemple, il serait intéressant de restituer le caractère dynamique des expériences urbaines. Une rue est ainsi perçue différemment selon qu'on la parcourt ou qu'on l'observe à l'aide d'une image statique. D'une part, des vidéos ou des séquences d'images pourraient être présentées aux

participants pour créer une situation plus réaliste. D'autre part, les modèles de prédiction futurs pourraient utiliser ces vidéos pour mieux représenter ce mouvement.

Une autre perspective est le développement de modèles capables d'évaluer la perception à différentes échelles spatiales – d'un point à une rue, jusqu'à des quartiers entiers. Cette prise en compte du contexte pourrait nous aider à comprendre comment les différents éléments de l'environnement urbain interagissent pour façonner notre expérience globale d'un lieu.

Enfin, les modèles actuels sont conçus pour prédire l'avis de la « foule », sans distinction des spécificités de chaque citoyen, ou de leur activité précise (trajet domicile-travail, promenade...). Prendre en compte ces éléments pourrait aider à mieux nous renseigner sur la manière dont un lieu est perçu.

L'objectif de cette recherche est de compléter le jugement humain ou les méthodes traditionnelles utilisées en urbanisme, en fournissant de nouveaux outils et perspectives pour aider à créer des villes plus vivables, agréables et répondant aux besoins de leurs habitants. En exploitant les outils de traitement d'image et les expériences collectives des citoyens, nous ouvrons de nouvelles possibilités pour comprendre et façonner les espaces urbains que nous habitons, tout en mettant en avant la perspective unique qu'a le piéton en ville. ■

À gauche, positions de caméra dans une rue à Singapour pour une voiture et un piéton ; à droite, images prises du point de vue du piéton et d'une voiture.

Image 360° d'une rue à Nantes (en projection équivalente).



© « nantes.jpg » : Google

## Le Consortium-HN pictoria : explorer la culture visuelle avec l'intelligence artificielle

### JEAN-PHILIPPE MOREUX

Chef de mission IA Bibliothèque nationale de France (BnF), direction des services et des réseaux

### JULIEN SCHUH

Professeur (Université Paris Nanterre), directeur adjoint de la Maison des sciences de l'homme mondes (UAR CNRS 3225)

### ANNE-VIOLAINE SZABADOS

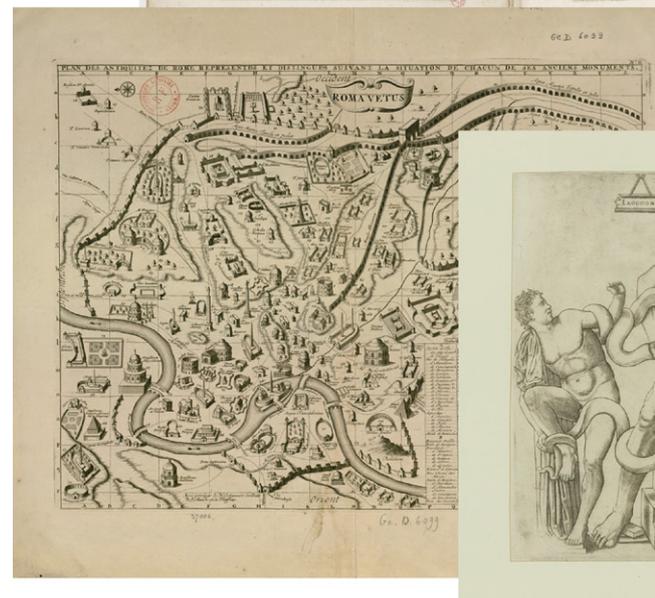
Ingénieure de recherche CNRS, UMR 7041 Archéologies et sciences de l'Antiquité (ArScAn)

De nombreuses institutions et équipes de recherche ont numérisé ces dernières années leurs archives et leurs collections, leurs sources d'étude et leur production scientifique. Devant la masse de données produite, elles se tournent désormais vers l'apprentissage machine et l'Intelligence artificielle (IA) pour explorer et enrichir ces contenus numériques dont l'ampleur ou le manque de description rend l'appréhension difficile.

### Le défi des corpus visuels

Les images, de nature variée et le plus souvent polysémiques, forment des corpus particulièrement complexes à aborder. Alors que la reconnaissance optique de caractères et les moteurs de recherche plein texte ont permis de transformer en profondeur l'accessibilité et l'exploration des corpus textuels<sup>1</sup>, comme ceux de la Bibliothèque nationale de France (BnF) sur Gallica, les images, même numérisées, restent un continent obscur bien plus difficile à observer<sup>2</sup>. Les outils d'IA rendent cependant possibles des traitements susceptibles d'extraire des informations des images, de les cataloguer et de les classer de manière semi-automatique. On peut désormais segmenter des images complexes pour en étiqueter le contenu, repérer la circulation de motifs, produire des descriptions avec des outils toujours plus puissants<sup>3</sup>.

Mais les solutions développées par des entreprises privées comme Google ou OpenAI sont essentiellement tournées vers des usages commerciaux et ont été entraînées sur des corpus surtout occidentaux et contemporains, excluant de leur champ d'application une grande partie des ressources historiques numérisées et des objets culturels. Le développement d'outils et de protocoles d'IA visuelle spécifiques aux questions et aux corpus des sciences humaines et sociales représente ainsi un enjeu essentiel pour nos disciplines et pour le patrimoine culturel. Le Consortium-HN pictoria (programme d'identification, classification, traitement d'images, observation et reconnaissance des formes par l'intelligence artificielle)<sup>4</sup>, labellisé en janvier 2024 au sein de l'IR\* Huma-Num<sup>5</sup>, s'inscrit dans cette dynamique de réflexion sur l'intégration d'outils et de méthodes d'IA pour améliorer l'exploration de corpus massifs d'images dans les institutions patrimoniales et les laboratoires de recherche.



1. Michael Moss, David Thomas et Tim Gollins, « The reconfiguration of the archive as data to be mined », *Archivaria*, n° 86, 26 novembre 2018, p. 118-151. <https://archivaria.ca/index.php/archivaria/article/view/13646> (site consulté le 15 juillet 2024).

2. Voir les articles dans le dossier « L'œil numérique » réuni par Laurence Danguy et Julien Schuh (dir.), *Sociétés & Représentations*, n° 55, 2023. <https://www.cairn.info/revue-societes-et-representations-2023-1.htm> (site consulté le 15 juillet 2024).

3. Voir Olivier Bonfait, Antoine Courtin et Anne Klammt (dir.), « Humanités numériques : de nouveaux récits en histoire de l'art ? », *Histoire de l'art*, n° 87, 2021 ; Thomas Smits et Melvin Wevers, « A multimodal turn in the Humanities. Using contrastive machine learning models to explore, enrich, and analyze digital visual historical collections », *Digital Scholarship in the Humanities*, vol. 38, n° 3, 2023. <https://doi.org/10.1093/lc/lqad008>, (site consulté le 15 juillet 2024).

4. <https://pictoria.hypotheses.org/> (site consulté le 15 juillet 2024).

5. Huma-Num IR\* est une très grande infrastructure de recherche, mise en œuvre par le CNRS avec le campus Condorcet et Aix-Marseille Université.

**Portage, partenaires et enjeux**

Porté par la Maison des sciences de l'homme mondes (UAR 3225), pictoria rassemble des partenaires et des spécialistes issus de disciplines très variées, tous unis par une même réflexion sur la meilleure manière d'intégrer des outils de vision par ordinateur dans leurs protocoles de recherche et de valoriser leurs vastes ensembles de données visuelles<sup>6</sup>.

Ce nouveau consortium s'appuie sur les dynamiques de décloisonnement développées par divers projets dans le cadre du Labex « Les passés dans le présent », qui a favorisé des échanges interdisciplinaires et intermétiers<sup>7</sup>.

Les outils d'IA visuelle ont le potentiel pour transformer en profondeur les pratiques de recherche dans plusieurs disciplines. De l'archéologie à l'histoire de l'art, de l'anthropologie à la sociologie, de l'architecture à la géographie, la recherche et l'identification de motifs, la classification d'objets, l'enrichissement de métadonnées, l'étude à grande échelle de médias visuels promettent de reconfigurer les savoirs, d'ouvrir de nouvelles pistes d'exploration, de décloisonner les disciplines. La circulation des images dans la presse,



analysée grâce à des outils de repérage de similarité graphique, en donne un exemple<sup>8</sup>. Les outils d'IA ont également des implications importantes pour les institutions patrimoniales, notamment pour faciliter l'analyse et la classification de vastes collections d'objets, de manuscrits ou d'œuvres d'art<sup>9</sup>.

Identification automatique d'une photographie d'Elie Kagan utilisée dans *Droit et Liberté* n° 200 du 1<sup>er</sup> mai 1961 dans le cadre du projet ModOAP. © La contemporaine/MRAP (https://archives.mrap.fr/mediawiki/index.php/Droit\_et\_Libert%C3%A9\_1948-1987) [site consulté le 15 juillet 2024]

6. Sur ces enjeux, voir l'équipe de recherche de bibliothèques numériques Aida pour la Library of Congress : Elizabeth Lorang et al., « Digital libraries, intelligent data analytics, and augmented description: A demonstration project », *Faculty Publications, UNL Libraries*, 10 janvier 2020. <https://digitalcommons.unl.edu/librarianscience/396> (site consulté le 15 juillet 2024).

7. <http://passes-present.eu/> (site consulté le 15 juillet 2024).

8. [https://modoap.huma-num.fr/Kagan\\_Contemporaine/index.php](https://modoap.huma-num.fr/Kagan_Contemporaine/index.php) (site consulté le 15 juillet 2024).

9. Marco Fiorucci et al., « Machine learning for cultural heritage: A survey », *Pattern Recognition Letters*, vol. 133, 1<sup>er</sup> mai 2020, p. 102-108; Giovanni Colavizza et al., « Archives and AI: An overview of current debates and future perspectives », *Journal on Computing and Cultural Heritage*, vol. 15, n° 1, 14 décembre 2021, p. 1-15. Voir les actions du réseau AI4LAM (Artificial intelligence for libraries, archives and museums) : <https://github.com/features/actions> (site consulté le 15 juillet 2024) ; le plan d'action coordonné européen pour l'IA : <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/coordinated-plan-artificial-intelligence-2021-review> (site consulté le 15 juillet 2024) ; et, dans ce numéro, l'article d'Emmanuelle Bermès, « AI4LAM : une communauté pour l'intelligence artificielle dans les bibliothèques, archives et musées », p. 52.



© gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Images du *Laocoon*, produites entre 1520 et 1927, diffusées sur Gallica : gravures isolées, recueil d'antiquités gravées, publication, photographies d'objets et d'estampage, carte.

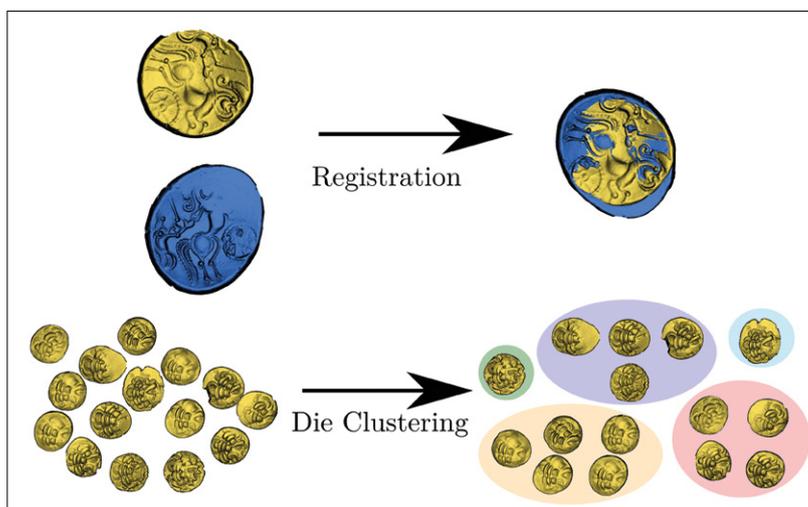
10. Voir par exemple la feuille de route IA de la BnF : <https://www.bnf.fr/fr/feuille-de-route-ia> ou la stratégie de l'INA : <https://www.ina.fr/actualites-ina/recherche-innovation> (site consulté le 15 juillet 2024). Le projet PENSE de l'INHA démontre ce qu'un visualiseur IIF complexe peut produire en matière de valorisation de corpus iconographiques complexes : <https://pense.inha.fr/> (site consulté le 15 juillet 2024).

11. Voir dans ce numéro : Marc Bui, Katherine Gruel et Olivier Masson, « DIANet, un outil pour l'identification automatique des coins monétaires à partir d'images 3D », p. 102.

De nombreuses institutions partenaires du consortium mènent déjà des réflexions ou ont développé des outils et des protocoles dans le domaine de la vision par ordinateur pour traiter des corpus d'images à une échelle industrielle. La BnF, l'Institut national d'histoire de l'art (INHA), l'INA, l'École nationale des chartes, l'Établissement de communication et de production audiovisuelle de la Défense

(ECPAD) ou les Archives nationales ont mis au point des stratégies de recherche et d'innovation utilisant l'IA pour l'exploration, l'analyse, l'enrichissement et la restauration de données visuelles<sup>10</sup>. Il en est de même avec des programmes de recherche comme DIANet porté par l'UMR Archéologie et Philologie d'Orient et d'Occident (AOroC, UMR 8546)<sup>11</sup>, consacré aux monnaies et coins monétaires celtiques. Les unités

Enregistrements de monnaies celtiques et regroupement/rapprochement par similarité de coins monétaires grâce à l'IA, projet DIANET (AOroC) et jeu de données RIEDONES3D. Sofiane Horache, Jean-Emmanuel Deschaud, Francois Goulette, Katherine Gruel, Thierry Lejars et Olivier Masson, « Riedones3D: A celtic coin dataset for registration and fine-grained clustering », dans Alan Chalmers et Vedad Hulusic (eds), *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, The Eurographics Association, 2021, figure 1, p. 83. 10.2312/gch.20211410 ; hal-03359796



de recherche qui composent le consortium disposent par ailleurs de corpus iconographiques et d'expertises croisées dans ce domaine : annotation et exploration de corpus d'images (ArScAn, AOroC, LARCA)<sup>12</sup>, analyse et histoire des circulations graphiques (InVisu UAR 3103<sup>13</sup>, DICEN-IdF<sup>14</sup>), définitions de référentiels et de thésaurus, gestion de bases de données patrimoniales et de photothèques (Maison des sciences de l'homme de Dijon, Centre Camille Jullian), informatique (LIPADE, LIP6)<sup>15</sup>. Des projets du Labex « Les passés dans le présent », comme la boîte à outils IA ModOAP, les projets EyCon ou MonumentAL ont par ailleurs défini des protocoles et développé des outils réutilisables sur des corpus iconographiques historiques : archives photographiques, périodiques illustrés, publications d'histoire de l'art, bases d'images patrimoniales<sup>16</sup>.

### Objectifs, missions, feuille de route

Le Consortium-HN pictoria vise ainsi à constituer un centre de ressources, d'accompagnement, de mise à disposition et d'exploration des outils d'IA visuelle pour les Sciences humaines et sociales (SHS) en France, un espace de dialogue et de partage de compétences. Il est organisé en trois axes principaux : données, exploration et formation.

### Les données

L'axe consacré aux données aspire à créer un écosystème collaboratif autour des données et de l'IA visuelle dans le domaine des SHS. L'objectif est triple : établir des normes pour des jeux de données fiables en SHS, développer des modèles d'IA spécifiques et garantir une intégration de ces avancées dans les plateformes et bases de données institutionnelles. Les progrès dans le domaine de l'IA et de l'apprentissage automatique dépendent en effet en grande partie de la qualité des jeux de données sur lesquels sont entraînés les outils<sup>17</sup>. Il est nécessaire, pour analyser les archives du passé, de réentraîner les modèles d'IA sur de nouveaux objets et classes afin de permettre un réel travail de quantification et de désinvisibilisation de certains objets, groupes ou personnes, dans une optique de science ouverte et permettant un meilleur accès aux données visuelles par le public. Le consortium entend produire des modèles et référentiels réutilisables pour assurer la compatibilité des données sur le long terme, et créer des corpus d'entraînement et de données annotées pour mesurer l'efficacité des nouveaux développements.

12. ArScAn : Archéologie et sciences de l'antiquité (UMR7041) ; LARCA : Laboratoire de recherche sur les cultures anglophones (UMR 8225).
13. InVisu est une Unité d'appui et de recherche CNRS (UAR), dédiée à « l'information visuelle et textuelle en histoire de l'art : nouveaux terrains, corpus, outils ».
14. DICEN-IdF : Dispositifs d'information et de communication à l'ère numérique – Paris, Île-de-France (EA 7339).
15. LIPADE, Laboratoire d'informatique Paris Descartes, Université Paris Cité, LIP6, Laboratoire de recherche en informatique de Sorbonne Université (UMR 7606).
16. ModOAP (Modèles et outils d'apprentissage profond) : <https://modoap.huma-num.fr/>, EyCon (*Visual AI and early conflict photography*) : <https://eycon.hypotheses.org/>, MonumentAL (Monuments antiques et traitement automatique de la langue) : <https://heurist.huma-num.fr/heurist/?db=MonumentAL&website&id=186> (sites consultés le 15 juillet 2024).
17. Curtis G. Northcutt, Anish Athalye et Jonas Mueller, « Pervasive label errors in test sets destabilize machine learning benchmarks », *arXiv*, 7 novembre 2021. <http://arxiv.org/abs/2103.14749> (site consulté le 15 juillet 2024).



Les étapes du projet Gallica Images (2024-2027) : recenser et identifier, indexer, donner accès.

### L'exploration

Le consortium se concentre sur le développement de prototypes et de plateformes pour tester et diffuser de nouvelles techniques, répondant aux besoins des chercheurs en SHS, telles la gestion et l'analyse des métadonnées générées par les outils de reconnaissance automatique de formes ou la création d'outils de visualisation et d'analyse de données pour une exploration plus efficace des archives, grâce aux potentialités du protocole standard IIIF (*International image interoperability framework*)<sup>18</sup>. Ces outils ont vocation à être incorporés dans les grilles de services de l'IR\* Huma-Num, avec une attention particulière à leur interaction avec des plateformes comme Sharedocs, Omeka ou Nakala<sup>19</sup>. Leur développement donnera lieu à des ateliers et des hackathons afin de les tester sur de nouveaux corpus, dans des contextes variés, et de faire émerger des usages, des contraintes, des solutions qui n'avaient pas été envisagés jusqu'à présent.

18. Voir Sophie Bertrand, Gaël Chenard, Stéphane Pillorget, Carine Prunet et Régis Robineau, « IIIF : découverte et interopérabilité sans frontières des images patrimoniales », *Culture et Recherche*, n° 143, p. 111-117.

19. Voir « La science ouverte », *Culture et Recherche*, n° 144, printemps-été 2023, 140 pages.

20. BnF DataLab : <https://www.bnf.fr/fr/bnf-datalab> ; HNLab : <https://www.huma-num.fr/hnlab/> (sites consultés le 15 juillet 2024).

### La formation

Pour permettre un accès facilité aux outils développés, pictoria ambitionne enfin de faire émerger une culture partagée de l'IA visuelle entre ses partenaires et participants. Il a déjà mis en place, en collaboration avec le DataLab de la BnF et le HNLab<sup>20</sup>, une série de séminaires-ateliers transdisciplinaires visant à générer des questionnements et à identifier de nouveaux besoins pour les SHS. Il a pour vocation de devenir un espace de réflexion et de pratique collectives sur l'IA, dans ses implications épistémologiques et technologiques aussi bien qu'éthiques.

Le Consortium-HN pictoria vise ainsi à répondre aux besoins exprimés à la fois par les communautés de chercheurs et de spécialistes des archives et par celles des collections patrimoniales et de la valorisation culturelle. La masse d'archives et de documents iconographiques numérisés offre de nouvelles perspectives d'exploration et d'exposition qui ne sont possibles que par une forme d'automatisation des pratiques traditionnelles de classification, de sélection et d'analyse de la recherche et de la documentation. Mais l'accès aux outils numériques d'intelligence artificielle et d'apprentissage profond est encore largement bloqué par la difficulté de mise en œuvre des outils informatiques d'IA pour les chercheurs qui ne sont pas spécialistes des humanités numériques. Les partenaires de pictoria ambitionnent de pallier ces manques par le développement d'outils immédiatement utilisables, la mise à disposition de modèles « ré-entraînaibles » pour diverses applications particulièrement demandées (classification et étiquetage des textes et des images, recherche de similarités, cartographie, analyses qualitatives) et de protocoles de traitement et de valorisation des fonds traités. Ce consortium permettra de développer de nouveaux protocoles d'analyse de données graphiques numérisées ; de contribuer à améliorer les métadonnées des catalogues et fonds numériques existants à l'aide des outils d'IA et à développer de nouvelles méthodes d'exploration des bases de données et de ressources en ligne patrimoniales pour le public ; enfin, de faire émerger une culture sur le traitement par l'IA des images dans les laboratoires, les institutions et les formations. ■

« L'accès aux outils numériques d'intelligence artificielle et d'apprentissage profond est encore largement bloqué par la difficulté de mise en œuvre des outils informatiques d'IA pour les chercheurs qui ne sont pas spécialistes des humanités numériques. »

# L'intelligence artificielle au service des patrimoines et de l'archéologie : une mutation en marche

Dans le domaine des patrimoines et de l'archéologie, l'IA apporte des outils innovants qui permettent de redécouvrir, de préserver et de valoriser notre héritage culturel d'une manière sans précédent. Comment l'IA est-elle appliquée aux patrimoines et à l'archéologie<sup>1</sup> ?

**THOMAS SAGORY**

Responsable du service du développement de la politique numérique, musée d'Archéologie nationale – domaine national du château de Saint-Germain-en-Laye

**CHATGPT-4**

## La cartographie et l'analyse spatiale des sites archéologiques

En combinant des relevés aériens et des technologies de télédétection avec des algorithmes d'apprentissage automatique, les archéologues peuvent détecter des sites enfouis ou difficilement accessibles. Les images aériennes et satellitaires sont analysées par des réseaux neuronaux pour identifier des anomalies ou des structures invisibles à l'œil nu.

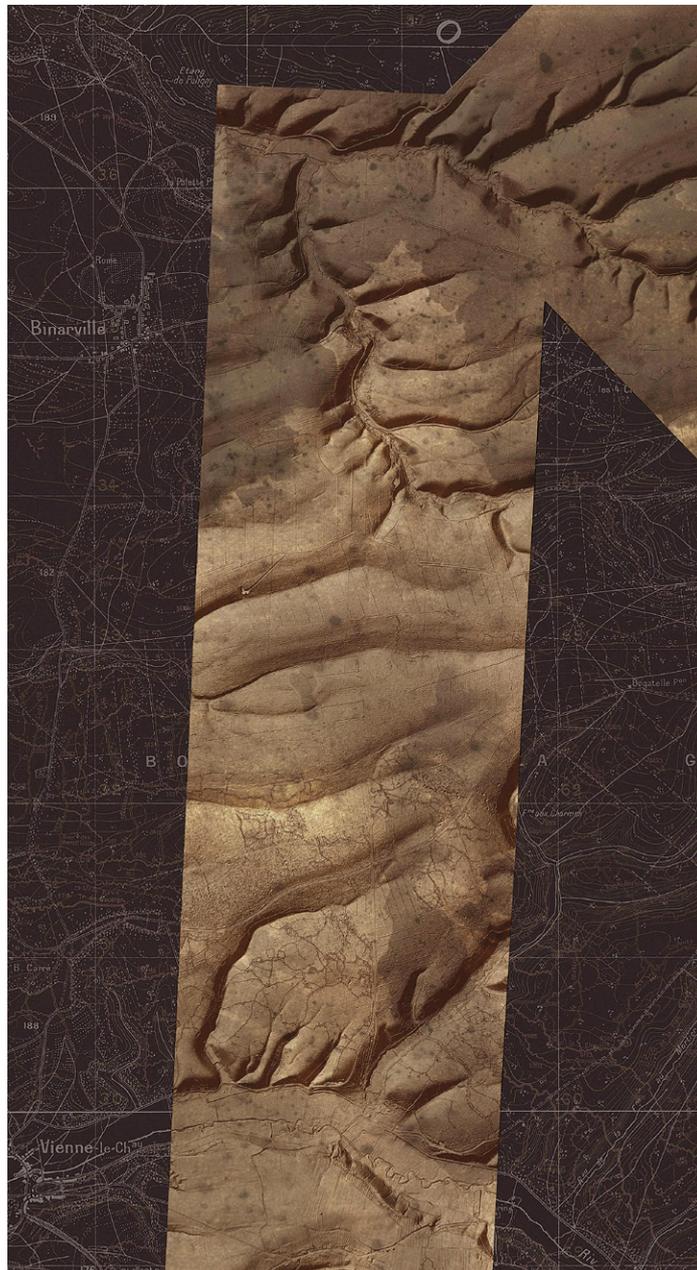
Par exemple, à Angkor, au Machu Pichu ou à Notre-Dame, l'utilisation de relevés LiDAR (*Light detection and ranging*)<sup>2</sup> et d'algorithmes d'IA permet de découvrir des structures cachées sous la végétation dense ou de percevoir l'intégralité d'un bâtiment complexe, et offre de nouvelles perspectives de recherche.

## La reconstruction virtuelle et la modélisation 3D

En utilisant des techniques de modélisation 3D et des algorithmes de reconstruction offerts par l'IA, les chercheurs peuvent recréer des structures et des objets à partir de fragments retrouvés. Ces modèles numériques permettent de visualiser des sites tels qu'ils étaient à l'époque, offrant ainsi un outil précieux pour l'étude et la diffusion des connaissances.

1. L'auteur s'est prêté au jeu d'une mise en abyme, en rédigeant, en juin 2024, le *prompt* suivant dans ChatGPT-4 « rédige-moi un article de 8500 signes consacré à l'intelligence artificielle appliquée aux patrimoines et à l'archéologie ». De nombreuses itérations ont permis de produire une première version. Un travail de relecture critique, de vérification des exemples (parfois totalement fantasmés) et d'ajouts de projets a permis d'aboutir à la version présentée ici.

2. Voir dans ce numéro l'article : Alexandre Guyot, Laurence Hubert-Moy, Marc Lennon et Thierry Lorho, « L'IA et la télédétection LiDAR. Un exemple d'application à la prospection archéologique en Bretagne », p. 98 ; Murielle Georges-Leroy, Laure Nuninger et Rachel Opitz, « LiDAR : technique de détection au service de l'archéologie », *Techniques de l'ingénieur*, 2014, 27 p. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/la-science-au-service-de-l-art-et-du-patrimoine-42579210/lidar-technique-de-detection-au-service-de-l-archeologie-in215/> (site consulté le 26 septembre 2024).



Relevé LiDAR du front d'Argonne ayant permis l'identification de nombreuses structures de la Grande Guerre. Extrait d'*Archéologie de la Grande Guerre* dans la collection « Grands sites archéologiques » : <http://archeologie.culture.gouv.fr/archeologie1418> (site consulté le 19 juillet 2024).



© Arthur Pequin

La Coupole, système opto-numérique d'acquisition de l'apparence des objets développée par le laboratoire MANAO/INRIA de Bordeaux.

Dans la ville de Palmyre<sup>3</sup> en Syrie, détruite en partie par des conflits récents, l'IA et la modélisation 3D ont été utilisées pour reconstruire virtuellement certains monuments détruits<sup>4</sup>, permettant aux chercheurs de continuer leurs études et au public de découvrir la splendeur passée de ce site du patrimoine mondial de l'UNESCO.

L'IA est aussi mobilisée pour développer de nouvelles méthodologies de numérisation 3D d'objets complexes (brillants, transparents, fins). Un projet de numérisation des monnaies en or du trésor de Tayac est en cours au musée d'Archéologie nationale avec le laboratoire de recherche MANAO<sup>5</sup>, dans le cadre de la convention entre le ministère de la Culture et l'INRIA. Cela ouvre aussi de nouvelles perspectives en matière de remontage, comme c'est le cas pour le plafond de l'abri sculpté du Roc-aux-Sorciers qui a fait l'objet d'un projet doctoral<sup>6</sup> qui se prolonge aujourd'hui dans le cadre des projets d'investissement d'avenir (PIA 4).

### La préservation et la gestion des données patrimoniales

L'IA facilite la recherche et la gestion des collections<sup>7</sup> en identifiant des objets, en leur attribuant des étiquettes et même en détectant des liens entre eux. Elle aide à organiser, à cataloguer et à analyser les quantités énormes de données accumulées par les musées et les institutions culturelles sur les objets de leurs collections<sup>8</sup>.

Le Rijksmuseum aux Pays-Bas utilise l'IA pour gérer sa vaste collection d'art<sup>9</sup>. Des algorithmes d'apprentissage automatique aident à cataloguer les œuvres, à identifier les artistes et les périodes, et même à découvrir des œuvres inédites ou mal attribuées.

Le projet Sloane Lab lancé par le British Museum catalogue et analyse sa vaste collection de plus de 8 millions d'objets. Le recours à l'IA est envisagé pour accélérer le processus de catalogue, mais aussi pour découvrir des liens et des contextes historiques qui n'avaient pas été identifiés auparavant. L'IA permettrait également de reconstituer des collections réparties dans des institutions différentes<sup>10</sup>.

### La protection du patrimoine contre le trafic illicite

L'IA offre des solutions pour lutter contre le trafic illicite des biens culturels en surveillant les marchés de l'art en ligne et en détectant les objets volés ou contrefaits. Des algorithmes de reconnaissance d'images sont utilisés pour comparer les photos d'objets sur des bases de données d'artefacts volés, facilitant ainsi leur identification et leur restitution.

Dans le cadre du projet ANCHISE, et plus précisément de PREVISION (*Prediction and visual intelligence for security information*)<sup>11</sup>, le musée d'Archéologie nationale du domaine national du château de Saint-Germain-en-Laye a ainsi pu contribuer à un atelier regroupant des professionnels de la lutte contre

3. Collection « Grands sites archéologiques » : <https://archeologie.culture.gouv.fr/palmyre> (site consulté le 26 septembre 2024).

4. Ahmet Denker, « Rebuilding Palmyra virtually: Recreation of its former glory in digital space », *Virtual Archaeology Review*, vol. 8, n° 17, 2017, p. 20-30. <https://doi.org/10.4995/var.2017.5963>

5. <https://www.inria.fr/fr/reproduire-lapparence-de-materiaux-textiles-un-defi-technologique> (site consulté le 19 juillet 2024).

6. Marie-Morgane Paumard, « Remontage sémantique de fragments grâce à l'intelligence artificielle », *Techné* [en ligne], n° 50, 2020, p. 58-62. <http://journals.openedition.org/techné/7796> ; <https://doi.org/10.4000/techné.7796> (sites consultés le 19 juillet 2024).

7. Brendan Ciecko, « Examining the Impact of Artificial Intelligence In Museums », *Museums and the Web*, 2017. [https://www.researchgate.net/publication/337916646\\_Examining\\_The\\_Impact\\_Of\\_Artificial\\_Intelligence\\_In\\_Museums](https://www.researchgate.net/publication/337916646_Examining_The_Impact_Of_Artificial_Intelligence_In_Museums) (site consulté le 19 juillet 2024).

8. Baptiste Caramiaux, « AI with Museums and Cultural Heritage », dans Sonja Thiel et Johannes Bernhardt (eds), *AI in Museums. Reflections, Perspectives and Applications*, Transcript Verlag, De Gruyter, 2023, p. 117-130. 978-3-8394-6710-7. 10.1515/9783839467107-011. hal-04399935

9. Benjamin Amir Giske, *Rijksmuseum: « The art of curating cultural works on digital platforms »*, 2021. [https://www.researchgate.net/publication/358747381\\_Rijksmuseum\\_-\\_The\\_art\\_of\\_curating\\_cultural\\_works\\_on\\_digital\\_platforms](https://www.researchgate.net/publication/358747381_Rijksmuseum_-_The_art_of_curating_cultural_works_on_digital_platforms) (site consulté le 19 juillet 2024).

10. Sloane Lab : <https://www.britishmuseum.org/research/projects/sloane-lab#aims> (site consulté le 19 juillet 2024).

11. Voir dans ce numéro les articles : Claire Chastanier et Axel Kerep, « L'IA et les nouvelles technologies à la rescousse de la lutte contre le trafic de biens culturels », p. 13 ; Titien Bartette, Véronique Chankowski et Irène Zaitsev, « L'innovation au service de la lutte contre le pillage et le trafic des biens culturels : le cas du projet européen ANCHISE et la place d'ICONEM », p. 17.



© MAN/Thomas Sagory

Séance de numérisation 3D d'un panneau de la mosaïque des saisons de Saint-Romain-en-Gal par les équipes du musée d'Archéologie nationale, domaine national du château de Saint-Germain-en-Laye, 2023.

le trafic illicite autour de l'application Arte-Fact de reconnaissance d'objets<sup>12</sup>. Des objets archéologiques sont scannés *via* l'application afin d'obtenir une information sur son origine et sa provenance. Certaines applications ont recours à l'IA pour surveiller les plateformes de vente en ligne et les réseaux sociaux, aidant les autorités à traquer les objets volés et à sensibiliser le public aux enjeux du trafic illicite. Grâce à cette technologie, plusieurs objets historiques ont déjà été récupérés et restitués à leurs pays d'origine.

### L'IA et les archives

Les algorithmes de traitement du langage naturel (NLP) permettent de déchiffrer, de traduire et d'interpréter des manuscrits anciens. Des fragments de textes peuvent être reconstitués et complétés grâce à des modèles d'IA entraînés sur des corpus de textes anciens.

Le projet de la Bibliothèque vaticane<sup>13</sup> est un exemple remarquable de cette application. En numérisant et en utilisant l'IA pour analyser des milliers de manuscrits anciens, les chercheurs ont pu découvrir des textes oubliés et mieux comprendre l'histoire et la culture des époques passées.

### L'IA comme aide à la visite *in situ* ou dans les mondes virtuels

L'IA et la Réalité augmentée (AR) se combinent pour offrir des expériences immersives *in situ* aux visiteurs de musées. Des applications AR permettent de visualiser des reconstitutions virtuelles en superposition avec le monde réel qui enrichissent l'expérience

éducative et engageant davantage le public. Le recours à des *chatbots* ou à des guides virtuels se développe aussi. La commission européenne a d'ailleurs produit une stratégie pour le Web 4.0 et les mondes virtuels<sup>14</sup>.

Le British Museum a intégré l'IA et l'AR dans ses expositions, permettant aux visiteurs de voir des artefacts dans leur contexte d'origine ou de visualiser des scènes de la vie quotidienne de civilisations anciennes. Ces technologies rendent les visites plus interactives et instructives.

Le musée d'Orsay a proposé l'expérience « Bonjour Vincent<sup>15</sup> » permettant au public d'échanger avec un avatar de Van Gogh. Les réponses sont générées par IA en s'appuyant sur le corpus de lettres écrites par le peintre.

### Les défis et les perspectives

L'Union européenne a produit un rapport sur les opportunités et les enjeux de l'IA dans le domaine culturel<sup>16</sup>. L'un des principaux enjeux est la qualité et la fiabilité des données. Les algorithmes d'IA sont aussi « bons » que les données sur lesquelles ils sont formés. Des données incomplètes ou biaisées peuvent mener à des conclusions erronées. Il est donc essentiel de garantir la qualité des données utilisées pour entraîner les systèmes d'IA.

De plus, l'intégration de l'IA dans les processus archéologiques et patrimoniaux nécessite une collaboration étroite entre les experts en technologie et les spécialistes du patrimoine. Les archéologues et les conservateurs doivent être formés à l'utilisation des outils d'IA, et les informaticiens doivent comprendre les spécificités et les exigences du domaine patrimonial.

L'intelligence artificielle ouvre des horizons nouveaux et passionnants pour les patrimoines et l'archéologie. De la découverte de sites cachés à la reconstruction virtuelle de civilisations disparues en passant par la protection des objets culturels, l'IA transforme en profondeur notre approche de l'histoire et de la culture et la manière dont nous comprenons et préservons notre patrimoine. La clé du succès réside dans une collaboration interdisciplinaire et une utilisation éthique et responsable de ces technologies innovantes ainsi que dans une montée en qualité des données structurées disponibles. ■

12. <https://www.culture.gouv.fr/Nous-connaître/Organisation-du-ministère/commission-de-recolement-des-depots-d-œuvres-d-art/Toutes-les-actualités-de-la-CRDOA/Arte-Fact-la-future-application-de-lutte-contre-le-traffic-des-biens-culturels> (site consulté le 19 juillet 2024).
13. <https://www.archimag.com/bibliotheque-edition/2024/03/25/vatican-reflechit-apports-intelligence-artificielle-bibliotheques> (site consulté le 19 juillet 2024).
14. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_3718](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3718) (site consulté le 19 juillet 2024).
15. <https://www.musee-orsay.fr/fr/articles/numerique-bonjour-vincent-275618> (site consulté le 19 juillet 2024).
16. <https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/359880c1-a4dc-11ec-83e1-01aa75ed71a1> (site consulté le 19 juillet 2024).



© MAN/Thomas Sagory

Série de boîtes à archives du service des ressources documentaires du musée d'Archéologie nationale, domaine national du château de Saint-Germain-en-Laye.



© MAN/Valérie Co

Les tablettes cunéiformes et les tablettes numériques comme illustration d'une forme de continuité des formes à travers le temps.

# L'IA et la télédétection LiDAR.

## Un exemple d'application à la prospection archéologique en Bretagne

L'évaluation des apports et des limites de l'Intelligence artificielle (IA) dans l'analyse de données géospatiales massives est un sujet aujourd'hui en pleine effervescence. Appliquées à la prospection par télédétection, ici sur une zone d'étude de la péninsule armoricaine, les recherches en observation de la Terre font face à des défis d'ordre méthodologique ainsi qu'à des contraintes inhérentes à la complexité et à la diversité du patrimoine archéologique.

### ALEXANDRE GUYOT

Attaché temporaire d'enseignement et de recherche, Université Rennes 2 – UMR CNRS 6554 Littoral-Environnement-Télédétection-Géomatique (LETG)

### LAURENCE HUBERT-MOY

Professeur des universités, Université Rennes 2 – UMR CNRS 6554 LETG

### MARC LENNON

Président de Hytech-imaging

### THIERRY LORHO

Conservateur régional de l'archéologie adjoint, Direction régionale des affaires culturelles (DRAC) Centre-Val de Loire

### L'IA en géoarchéologie : un nouvel outil d'aide à la prospection ?

Depuis les premières images aériennes jusqu'à la démocratisation de la LiDAR (*Light detection and ranging*) topographique aéroportée<sup>1</sup>, la télédétection participe, par des observations de résolution spatiale, temporelle ou spectrale de plus en plus précises, à documenter de manière non destructive l'extraordinaire diversité des sites et paysages archéologiques.

Ces dernières années, l'Intelligence artificielle (IA), qui suscite de nombreuses discussions scientifiques et sociétales dans toutes les sphères de la recherche, vient aussi questionner les pratiques dans le domaine de la géoarchéologie numérique.

Comment impliquer l'IA dans les techniques d'analyse des données spatiales afin de repousser les limites de l'approche traditionnelle de prospection aérienne, notamment sur des territoires masqués (en contexte forestier ou même en contexte littoral immergé) ?

Comment adapter les méthodes de télédétection aux besoins de l'archéologie d'aujourd'hui ? Quels sont les apports et les limites des approches proposées ?

C'est sous le prisme de ces questions qu'un travail de recherche<sup>2</sup> est mené en Bretagne depuis 2018 en collaboration avec le laboratoire Littoral-Environnement-Télédétection-Géomatique (LETG) de l'Université Rennes 2, la société Hytech-imaging et avec le soutien de la DRAC Bretagne – Service régional de l'archéologie (SRA). La péninsule armoricaine est un terrain de recherche d'une grande richesse et diversité archéologique. L'axe dédié à l'évaluation des données

LiDAR et des méthodes d'IA (telles que les réseaux de neurones convolutifs) s'est concentré sur le patrimoine mégalithique du territoire de Carnac et des rives du Morbihan, avec un focus sur les tumulus néolithiques.

### La recherche d'anomalies topographiques par réseau de neurones convolutifs

Depuis leurs prémices dans les années 2000, les travaux de prospection à partir de données LiDAR s'effectuent principalement par photo-interprétation des Modèles numériques de terrain (MNT), visualisés avec des effets d'ombrage sous lumière virtuelle.

Outre la problématique de filtrage du nuage de points pour modéliser la topographie le plus fidèlement possible, la visualisation du MNT par éclairage virtuel (dont les paramètres sont statiques et prédéfinis en angle et en élévation) rend difficilement perceptibles les variations topographiques subtiles ou caractérisées par des signatures multi-échelles.

La première approche de ces travaux de recherche a justement consisté à définir une technique de visualisation du relief qui met en évidence les anomalies topographiques attribuées à la présence de tumulus, en prenant en compte les informations multiscales<sup>3</sup>. Il s'agit ainsi d'extraire de manière automatique les caractéristiques de la position topographique de chaque observation (pixel) du MNT à différentes échelles spatiales. Les caractéristiques de variation de la position de dominance dans le relief sont représentées sur une image composite de type *Multiscale topographic position* (MSTP) avec les canaux bleu, vert et rouge utilisés pour représenter les résultats d'analyse de voisinage, respectivement jusqu'à 10, 100 et 1 000 m

1. La télédétection par laser ou LiDAR est une technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur.

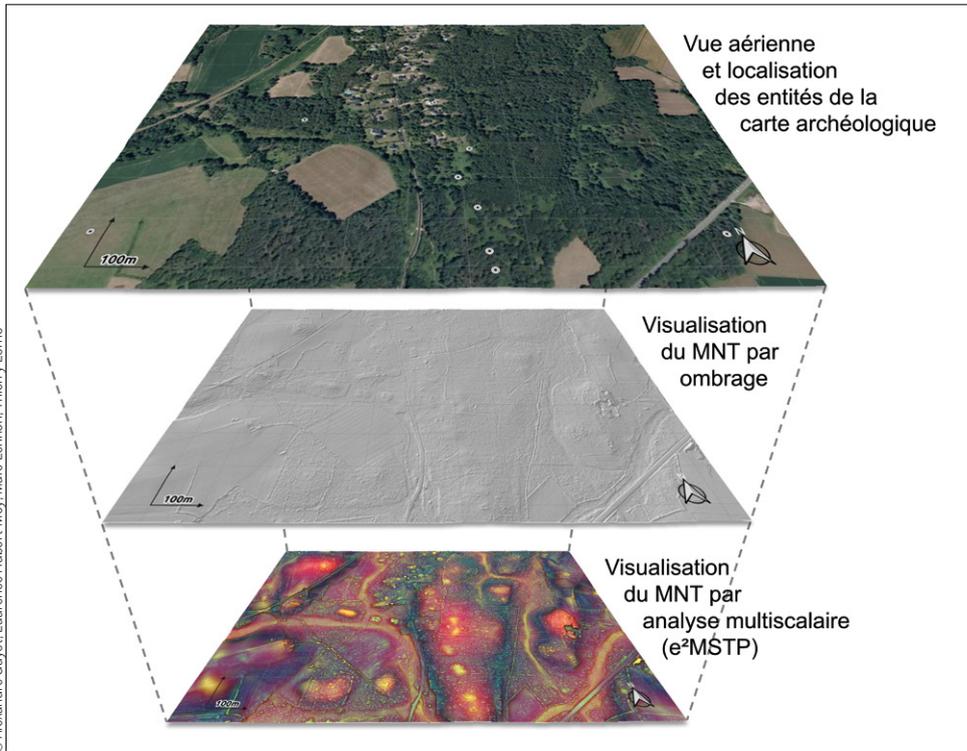
2. Alexandre Guyot, *Apport des données LiDAR et hyperspectrales aéroportées pour la cartographie archéologique en milieux terrestres et immergés*, thèse de doctorat, Université Rennes 2, 2021. <http://www.theses.fr/s217045> (site consulté le 18 septembre 2024).

3. Alexandre Guyot, Laurence Hubert-Moy et Thierry Lorho, « Detecting neolithic burial mounds from LiDAR-derived elevation data using a multi-scale approach and machine learning techniques », *Remote Sensing*, vol. 10, n° 2, 2018, p. 225. <https://doi.org/10.3390/rs10020225> (site consulté le 18 septembre 2024).

de distance. Cette technique permet de mettre en évidence la présence de tumulus, y compris sous couvert forestier et pour des structures très arasées.

Les réseaux de neurones convolutifs vont permettre une exploration automatique de ces visualisations

dérivées des données LiDAR à large échelle en deux phases. Lors de la première (la phase d'apprentissage), l'algorithme, confronté à des données d'exemples (des anomalies topographiques liées à la présence de tumulus visibles dans les images composites), va estimer de manière itérative et progressive les millions



Mise en évidence d'anomalies topographiques par analyse multiscalaire (en bas) à partir de MNT LiDAR (au milieu) et comparaison à la vue aérienne (en haut) sur le secteur de Lann Granvillarec (Carnac).

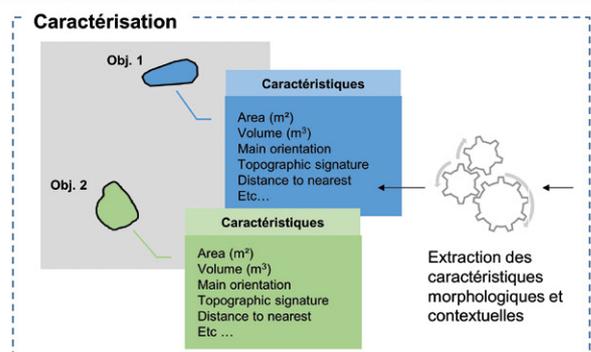
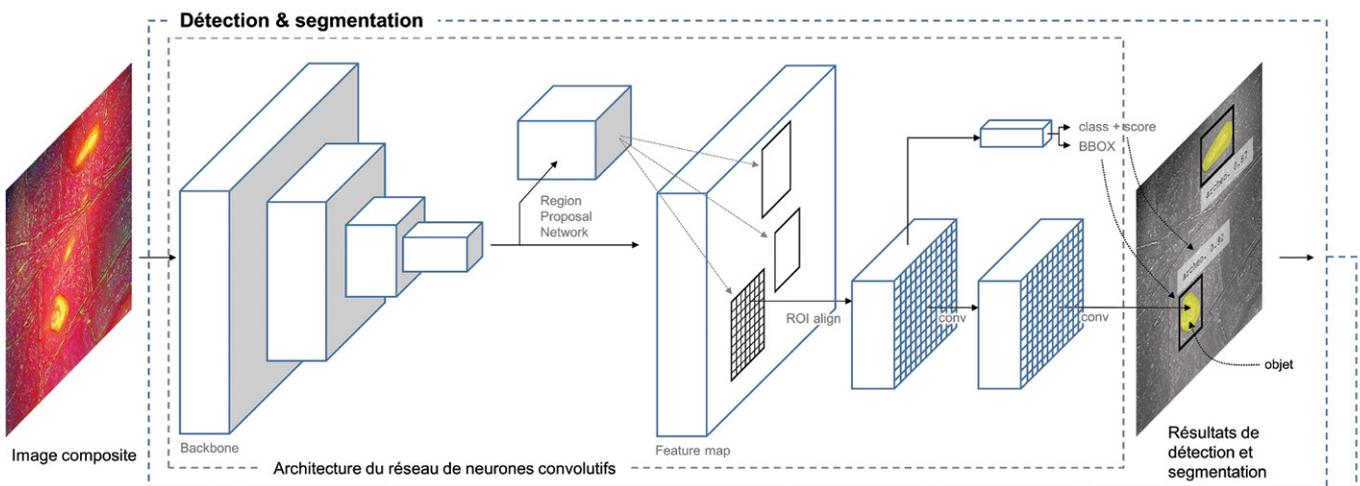


Diagramme d'analyse des images dérivées du LiDAR pour la détection et la segmentation de structures archéologiques par réseau de neurones convolutifs.  
© Alexandre Guyot, Laurence Hubert-Moy, Marc Lennon, Thierry Lorho

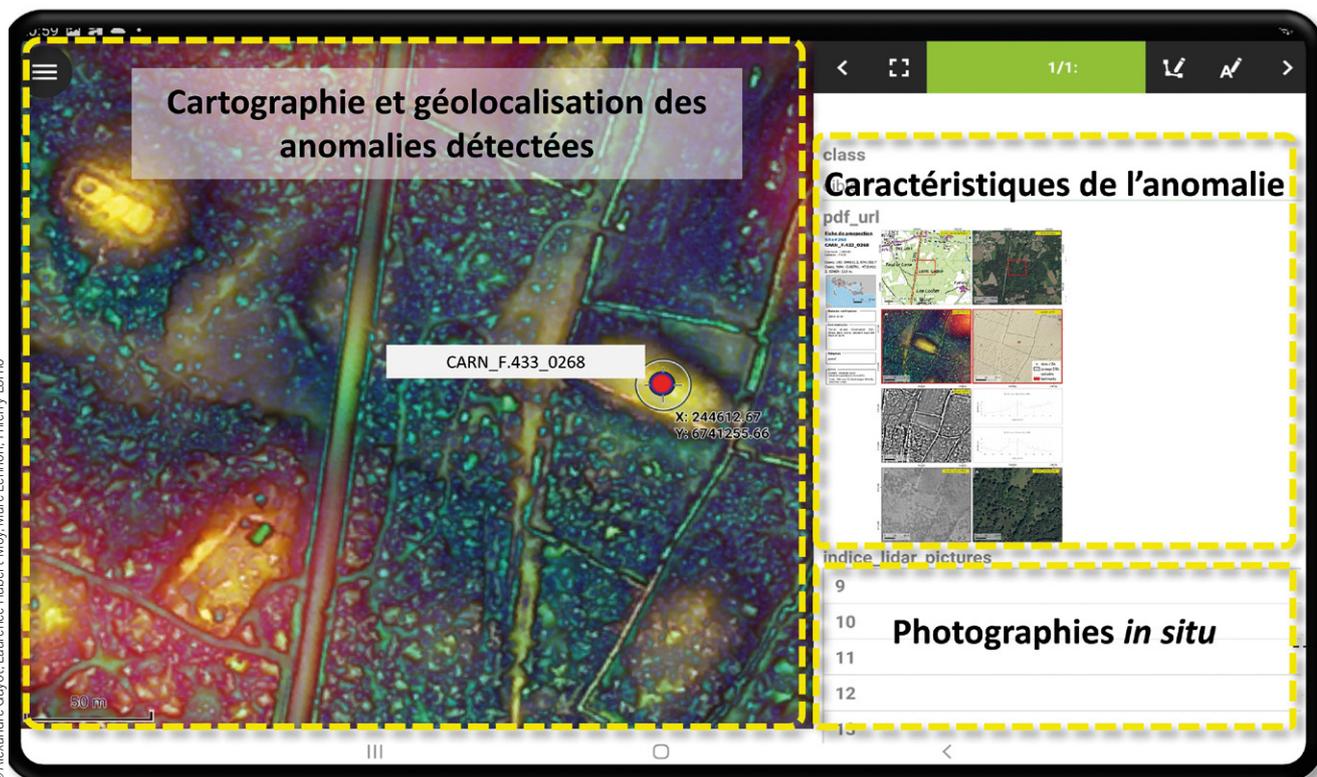
de paramètres du réseau qui décriront avec différents niveaux d'abstraction les caractéristiques morphologiques et contextuelles des sites connus sur la zone d'étude.

Cela aboutit à un modèle d'IA capable, lors de la seconde phase (la phase d'inférence), d'analyser automatiquement l'ensemble des images composites dérivées du LiDAR et d'y détecter des anomalies topographiques qui découlent des caractéristiques assimilées précédemment. Les résultats de détections localisés et caractérisés par analyse automatique des données LiDAR constituent une liste de potentiels sites archéologiques à vérifier sur le terrain.

Alors que les modèles d'apprentissage automatique traditionnels se basent sur des caractéristiques pixels

à pixels, l'approche par réseau de neurones convolutifs, inspirée par les processus biologiques de la vision, fonctionne par extraction de caractéristiques contextuelles à différents niveaux d'abstraction pour localiser et segmenter – identification de la forme – les structures d'intérêt. C'est notamment cette segmentation qui permet de compléter la caractérisation morphologique de l'anomalie et de faciliter son interprétation sur image afin d'orienter les vérifications *in situ*. Sur le terrain, en particulier en contexte forestier, où le manque de visibilité et de repères freine la progression pédestre, le travail de vérification sera facilité par l'apport de la visualisation sur tablette numérique des anomalies topographiques caractérisées, géo-positionnées et présentées dans leur contexte.

Orientation des vérifications sur le terrain par géolocalisation des résultats de détection et caractérisation de sites potentiels sur tablette numérique avec le logiciel Qfield.



© Alexandre Guyot, Laurence Hubert-Moy, Marc Lemmon, Thierry Lortho

La mise en évidence des anomalies topographiques sur MNT est une étape cruciale de la prospection par LiDAR. Le nombre et la diversité des techniques de visualisation sont croissants et les méthodes d'évaluation objective font défaut. Ce constat nous a poussés, dans un deuxième temps, à utiliser l'IA comme un outil d'évaluation quantitative. En appliquant une douzaine de techniques de visualisation différentes et en entraînant un réseau de neurones convolutifs pour la détection et segmentation des anomalies topographiques, nous avons ainsi pu comparer les résultats statistiques de chaque modèle (un modèle par technique de visualisation) et proposer un classement de ces techniques selon leur performance. C'est d'ailleurs par cette approche qu'une technique hybride basée sur la représentation combinée de caractéristiques topographiques multi-échelles et de caractéristiques morphologiques locales (e<sup>2</sup>MSTP) a pu être développée. Ainsi, l'IA devient, au-delà d'un outil de détection automatique, une aide à la conception et à l'amélioration de techniques de visualisation de MNT pour l'archéologie.

#### Les défis de la généralisation à d'autres contextes géoarchéologiques

Les données et méthodes appliquées ici sur les tumulus néolithiques ont été développées en conservant à l'esprit qu'elles concernaient une typologie de sites particulière et un territoire limité. En effet, l'IA et le LiDAR ne sauraient répondre à l'ensemble des problématiques de prospection par télédétection. Les traces archéologiques vues du ciel ou de l'espace ne se limitent pas aux traces topographiques. D'autres traces, telles que les variations spectrales en surface dans le domaine optique ou thermique, comme les enclos arasés par exemple, ou des variations de rétrodiffusion des sols dans le domaine des hyperfréquences, pourraient être identifiées et caractérisées par d'autres programmes de couverture globale d'imagerie (satellitaire ou aérienne, hyperspectrale ou radar). Là aussi, l'IA pourrait apporter une aide à l'analyse de ces données aussi informatives que massives et complexes, mais la mise à l'échelle reste un défi majeur. Le programme LiDAR HD de l'IGN – qui couvrira l'ensemble du territoire national d'ici 2026 – participe à relever ce défi et constitue un catalyseur de

« Le foisonnement de données et de méthodes de télédétection offre une opportunité pour compenser en partie la diminution inexorable des prospections aériennes en s'affranchissant de la saisonnalité et de l'autonomie des missions aéroportées. »

développement de méthodes ouvertes qui devraient progressivement permettre d'analyser une plus grande diversité de contextes géoarchéologiques. Le foisonnement de données et de méthodes de télédétection offre une opportunité pour compenser en partie la diminution inexorable des prospections aériennes en s'affranchissant de la saisonnalité et de l'autonomie des missions aéroportées. Toutefois, le développement de l'IA pour la prospection nécessite la prise en compte des réalités, contraintes et enjeux de l'archéologie de terrain. Sur les quelque 170 km<sup>2</sup> de l'emprise LiDAR de la zone de Carnac et des rives du Morbihan, les résultats de détection et segmentation ont permis d'identifier des centaines d'anomalies potentielles, plusieurs dizaines ont déjà été vérifiées avec l'expertise du SRA, avec un taux de validation de structures de l'ordre de 50 %, mais le chantier est d'envergure. À l'instar de l'exemple néerlandais<sup>4</sup>, l'archéologie participative, avec l'appui des associations archéologiques, pourrait faciliter l'exploitation de cette masse de résultats à vérifier sur le terrain, d'une part pour l'enrichissement de la carte archéologique, d'autre part pour compléter les bases de connaissances indispensables à l'amélioration des modèles d'IA qui restent très dépendants de la quantité et de la qualité des données d'entraînement. ■

4. Karsten Lambers, Wouter B. Verschoof-van der Vaart et Quentin P. J. Bourgeois, « Integrating remote sensing, machine learning, and citizen science in Dutch archaeological prospection », *Remote Sensing*, vol. 11, n° 7, p. 794, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11070794> (site consulté le 18 septembre 2024).

« Le programme LiDAR HD de l'IGN – qui couvrira l'ensemble du territoire national d'ici 2026 – participe à relever ce défi et constitue un catalyseur de développement de méthodes ouvertes qui devraient progressivement permettre d'analyser une plus grande diversité de contextes géoarchéologiques. »

# DIANet, un outil pour l'identification automatique des coins monétaires à partir d'images 3D

Le développement de l'Intelligence artificielle (IA) ouvre de nombreuses opportunités, notamment pour l'identification des monnaies de même coin, c'est-à-dire issues de la même matrice, que ces pièces soient bien conservées ou bien dégradées par le décentrage, l'usure, la corrosion.

## MARC BUI

Directeur d'études cumulant, UMR CNRS 8546 Archéologie et philologie d'Orient et d'Occident (AOROC), École pratique des hautes études (EPHE) – Université Paris Sciences et Lettres (PSL), Professeur des universités, Université Paris 8,

## KATHERINE GRUEL

Directrice de recherche (émérite) au CNRS

## OLIVIER MASSON

Ingénieur-chercheur, développeur informatique, École normale supérieure (ENS)-EPHE-PSL

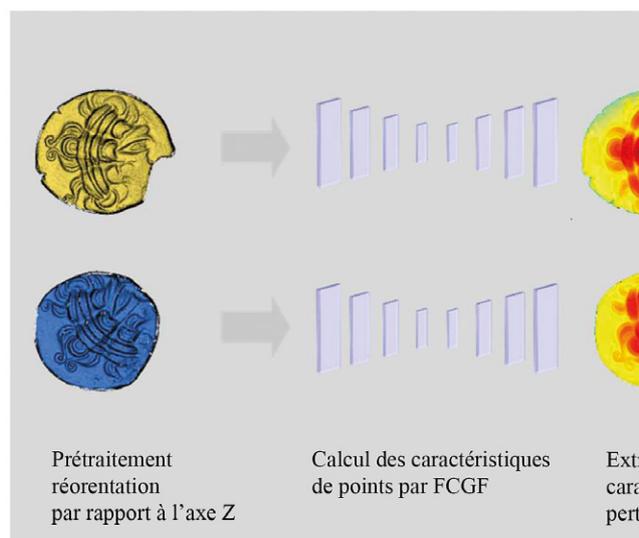
Partant de l'expérience acquise dans le classement manuel des monnaies par coins, nous avons mis au point un protocole d'analyse des images intégrant des techniques d'apprentissage profond (*deep learning*)<sup>1</sup> et des algorithmes de regroupement vérifiés par des diagrammes de similarité entre les pièces. Après validation des résultats par l'homme, ceux-ci pourront être intégrés dans le processus pour affiner encore les capacités d'identification.

## DIANet, de la recherche à la production

DIANet est une interface web<sup>2</sup> permettant à l'expert numismate de :

- créer des collections ou lots, dans lesquels l'utilisateur va téléverser ses fichiers de monnaies numérisées en entrée ;
- lancer dans l'ordre les quatre étapes de calcul sur un lot spécifique par un simple clic sur des « boutons d'étape », avec un code couleur informant sur l'état de réalisation (bleu : « accessible », gris : non encore accessible, rouge : en cours de traitement, vert : achevée) ; cela garantit qu'une étape de calcul ne peut être lancée tant que la précédente n'a pas été réalisée ; il est également possible de mettre en pause un calcul ;
- afficher le graphe de similarité avec la possibilité de régler son seuil en pourcentage. Chaque cluster est représenté dans une couleur différente afin de faciliter visuellement son identification ; à la modification du seuil, les clusters se réorganisent instantanément sans avoir à recharger la vue ;

A partir des calculs exploitables...



... des boutons d'actions utilisateurs correspondants p

■ non réalisée, accessible - ■ non réalisée, non encore acces

1 prétraitement

2 caractéristiques

1. L'apprentissage profond est un procédé d'apprentissage automatique utilisant des réseaux de neurones possédant plusieurs couches de neurones cachées. Ces algorithmes possédant de très nombreux paramètres, ils demandent un nombre très important de données afin d'être entraînés.

2. Cette interface, développée avec le *framework* Django, est dissociée physiquement de la composante de calcul et peut être hébergée sur un serveur indépendant du serveur de calcul.

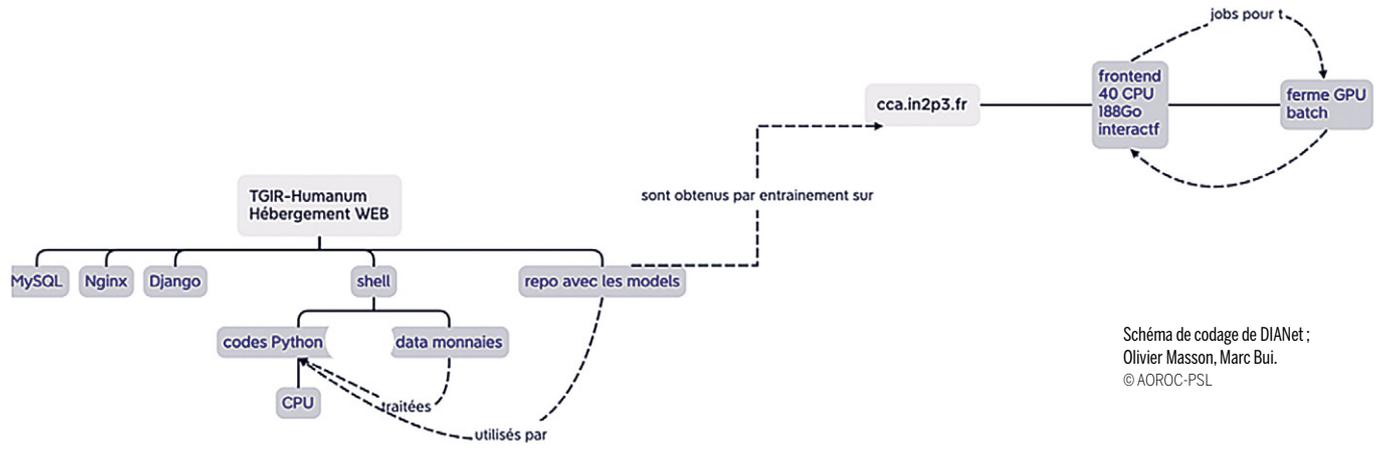
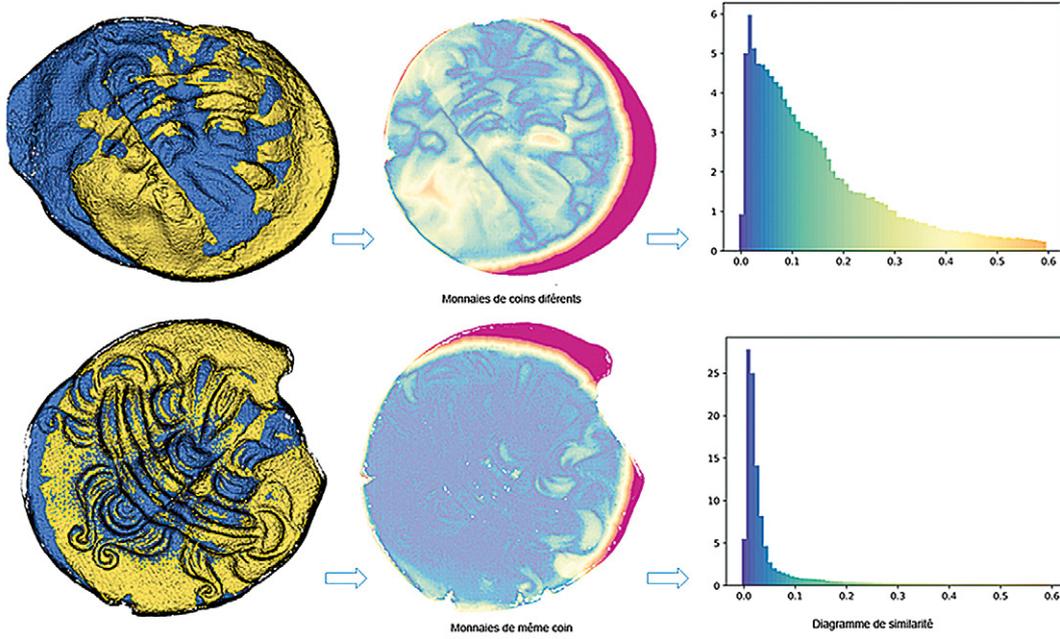


Schéma de codage de DIANet; Olivier Masson, Marc Bui. © AOROC-PSL



Identification de coins riedones similaires ou différents, histogramme des distances; Sofiane Horache, Katherine Gruel. © AOROC-PSL

pour les commander depuis l'interface web :

possible - ■ finalisée - ■ calcul en cours

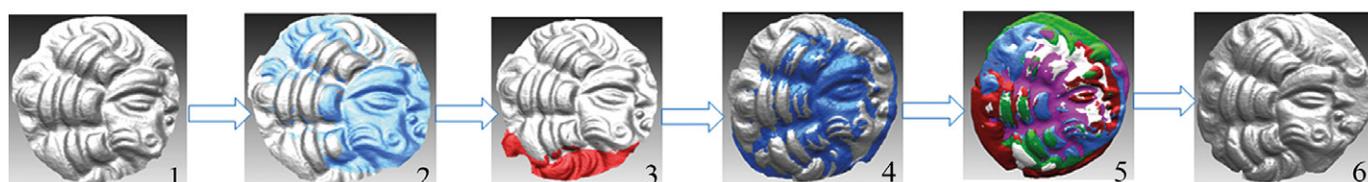
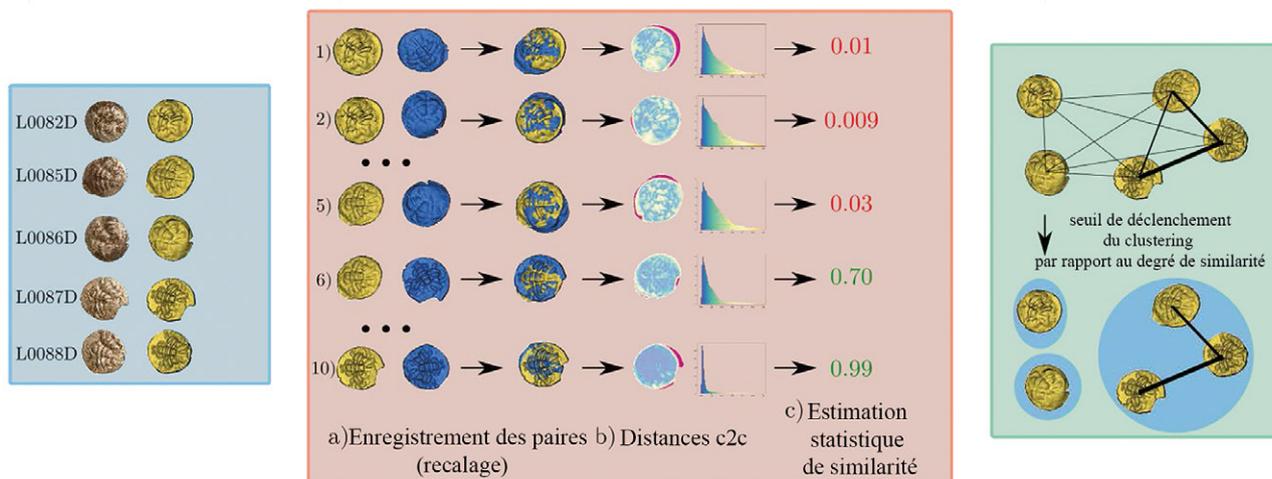
3 comparaison

4 graphe

DIANET

AOROC CNRS PSL

Fonctionnement de l'interface DIANet, des fichiers 3D au graphe de similarité des monnaies; Olivier Masson. © AOROC-PSL



Contribution de monnaies riedones de même coin à la restitution de l'image restituée du coin en 6

Les principales étapes du calcul et les résultats sur 5 monnaies du même coin aboutissant à la restitution de l'image complète (6) ; Sofiane Horache, Katherine Gruel.  
© AOROC-PSL

- exporter un tableur listant le nom des monnaies par coin (correspondant à chaque cluster) ;
- télécharger les rendus en à-plat (format PNG) des fichiers 3D réorientés dans des sous-répertoires correspondant aux coins identifiés (numéros générés automatiquement et correspondant à chaque cluster détecté) ;
- exporter le fichier JSON ayant servi à la génération du graphe (liste des étiquettes de chaque paire de monnaies comparées, associées au poids de la liaison basé sur leur degré de similarité).

### Le protocole de calcul mis en place

En vue d'estimer si plusieurs monnaies ont été initialement générées par un même coin, le système doit reconnaître, automatiquement, grâce à l'apport de l'IA (*deep learning*), les similarités entre elles sur le plan global (figure) et sur des éléments spécifiques (présence ou non de motifs particuliers).

Sur la base des travaux sur le corpus Riedones3D<sup>3</sup>, la chaîne de calcul de DIANet repose sur quatre phases de traitements opérés sur les fichiers 3D de monnaies

numérisées en entrée au format STL (*meshes*) : pré-traitement ; calcul des caractéristiques ; calcul des transformations ; génération du graphe de similarités<sup>4</sup>.

### Prétraitement et recalage des fichiers 3D d'entrée

Il s'agit d'abord d'effectuer des traitements sur les fichiers de monnaie issus de leur numérisation 3D à l'aide d'un scanner haute résolution, d'une précision au 1/10° de micron<sup>5</sup>. Les données en entrée du processus sont des représentations numériques au format 3D des monnaies sous forme de fichiers STL, c'est-à-dire des maillages contenant des informations de type point, arête, face.

Les modèles 3D sont réorientés selon l'axe Z puis convertis au format PLY, les rendant exploitables pour des calculs en tant que nuages de points 3D, grâce au module PyTorch3D<sup>6</sup>, qui se chargera tout au long du processus de les convertir en représentations alternatives. Cela permet d'introduire un calcul de similarité entre nuages de points au moyen de bibliothèques Python spécialisées pour l'IA.

### Le calcul des transformations

Cette étape réalise un rapprochement des nuages de points par application d'algorithmes de recalage des nuages de points de monnaies distinctes et produit des histogrammes de distance. Cette tâche d'une complexité calculatoire dépend du nombre d'items considérés dans les nuages de points respectifs : elle est rendue plus performante par l'approche IA originale de DIANet.

Il faut déterminer les transformations – translations de sommets/points et rotations de vecteurs – pour rendre similaires les deux nuages de points à comparer. Un estimateur (« ransac », « teaser++ »<sup>7</sup> ou « fgr ») définit une règle de comparaison, à partir

3. Sofiane Horache, Jean-Emmanuel Deschaud, François Goulette, Katherine Gruel, Thierry Lejars et Olivier Masson, « Riedones3D: A celtic coin dataset for registration and fine-grained clustering », dans Alan Chalmers et Vedad Hulusic (eds), *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, The Eurographics Association*, 2021, 10.2312/gch.20211410 : hal-03359796. Voir dans ce numéro : Jean-Philippe Moreux, Julien Schuh et Anne-Violaine Szabados, « Le Consortium-HN pictoria : explorer la culture visuelle avec l'intelligence artificielle », p. 90.

4. Chaque étape est assurée par un script principal Python.  
5. EAICON, Eotech.

6. <https://pytorch3d.org/> Le module PyTorch3D convertit chaque fichier PLY en fichier PT, stockant l'ensemble des caractéristiques point par point : on stocke ainsi les caractéristiques géométriques locales (coordonnées brutes), mais surtout celles du nuage de points dans sa globalité (comme sa position initiale par rapport à l'ensemble des autres points), à partir d'un modèle pré-entraîné sur la base de l'algorithme FCGF (*fully convolutional geometric feature*) (*deep learning*).

7. Heng Yang, Jingnan Shi et Luca Carlone, « TEASER: Fast and certifiable point cloud registration », *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, n° 2, p. 314-333, avril 2021, 10.1109/TRO.2020.3033695

de certains paramètres (bruit à prendre en compte autour des sommets des modèles 3D initiaux; nombre de points à estimer, identique pour les deux objets à comparer; seuil de proximité de déclenchement de l'évaluation entre deux points, etc.)<sup>8</sup>.

**Le calcul du graphe de similarités (clusters)**

Cette étape construit un graphe de similarité. C'est une représentation abstraite avec des nœuds (sommets) qui représentent les monnaies et des liens (arêtes) qui montrent la similarité entre 2 monnaies.

La détection de similarité entre monnaies se base sur les histogrammes de distance produits à l'étape 2. On peut ainsi construire des « amas » (ou clusters) dans le graphe qui traduisent le fait que des monnaies se ressemblent et constituent des groupes homogènes<sup>9</sup>.

L'IA permet donc de produire une source d'informations issue des données de nuages de points, sur laquelle l'expert numismate peut s'appuyer. Le résultat peut être affiné en fixant correctement le seuil de la valeur que doit atteindre l'évaluation d'un lien entre chaque monnaie afin de caractériser le fait qu'elles proviennent du même coin. Le graphe encode les relations existantes entre elles, en évaluant la similarité potentielle des nuages de points. Par la suite, ce graphe et les modifications qui lui sont apportées (fichier JSON) seront à nouveau exploités par l'IA pour capitaliser la connaissance de l'expert numismate suite à ses analyses approfondies sur un corpus. Il a vocation à être réutilisé pour toute nouvelle monnaie qui serait introduite dans le jeu de données afin de voir de quel coin elle serait issue.

La base de ce travail est l'exploitation d'images 3D des pièces scannées au 1/10<sup>e</sup> de microns qui fournissent la précision nécessaire et un

« Le protocole mis en place ici pourrait facilement s'adapter à l'identification d'images similaires, composées à l'aide de poinçons ou de moules réutilisables sur céramique comme sur métal. »

maillage géométrique sur lequel appuyer l'apprentissage profond. DIANet vise donc à intégrer l'IA dans nos pratiques régulières de travail par la création d'une interface utilisateur qui permet à partir des microtopographies de surface de chaque pièce d'en analyser les ressemblances et les différences et de les classer par coin afin de restituer l'image originelle. Ces classements, validés par plusieurs outils statistiques, débouchent sur de nouveaux documents pour l'histoire de l'art: à partir de plusieurs images identifiées comme étant du même coin, on en restitue l'image complète. Ils fournissent aussi des informations indispensables pour évaluer le volume des émissions monétaires, pour mieux comprendre le fonctionnement des ateliers de fabrication monétaire, pour identifier les modes de gravure, l'usage de poinçons, les accidents de frappe, les retouches... Le protocole mis en place ici pourrait facilement s'adapter à l'identification d'images similaires, composées à l'aide de poinçons ou de moules réutilisables sur céramique comme sur métal. ■

8. Le script Python associé génère deux fichiers au format numpy, le premier regroupant les transformations à effectuer (hist.npy), le second fichier, résultant de celui-ci, intégrant l'ensemble des « distances » point par point (transfo.npy) en vue de produire un histogramme de distances.

9. Ce résultat est issu d'un modèle d'apprentissage pré-entraîné (MinkUNet\_Fragment.pt) dont les données sont sérialisées dans un fichier PKL. À partir de ce fichier, du fichier « hist.npy » généré précédemment et d'un fichier JSON contenant les moyennes des résultats de comparaison précédents avec leur déviation standard, le script Python génère un fichier JSON recensant, pour chaque paire de monnaies comparées, le poids de leur liaison, calculé symétriquement entre deux monnaies (proche de 0 : les monnaies sont très différentes ; proche de 1 : les monnaies sont similaires).

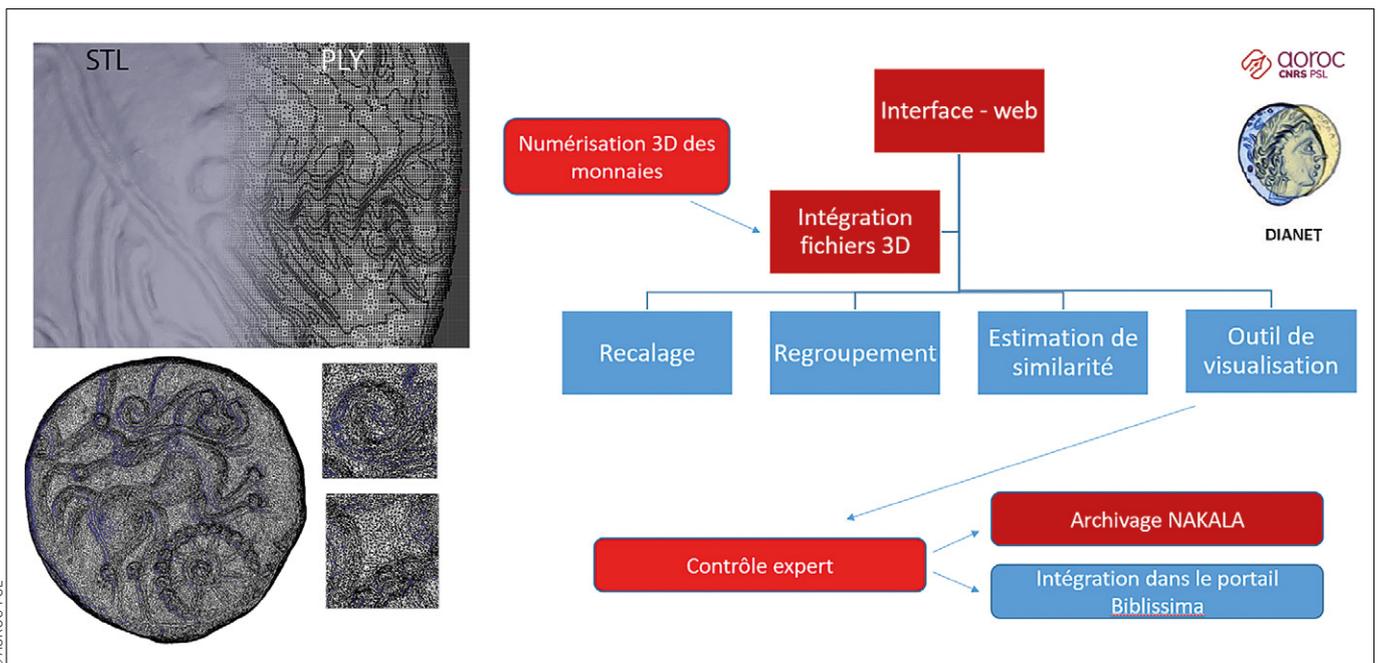


Schéma des phases de la recherche depuis les scans 3D en STL puis PLY des pièces jusqu'à l'archivage des résultats et leur présentation ; Katherine Gruel, Olivier Masson.

# ArchéoBot :

## une IA conversationnelle pour l'enseignement de l'archéologie

Le contexte de transformation numérique accélérée, de croissance et de diversification des effectifs étudiants à l'université, d'augmentation significative des publications scientifiques (le plus souvent en format numérique) et d'émergence de *chatbots* d'intelligence artificielle générative depuis novembre 2022 incite à repenser la pédagogie universitaire, notamment dans le domaine des sciences humaines et sociales.

### VINCENZO CAPOZZOLI

Maître de conférences, archéologue,  
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne –  
UMR CNRS 8215 Trajectoires.  
De la sédentarisation à l'État

### ALAIN DUPLOUY

Maître de conférences, HDR,  
archéologue, Université Paris 1  
Panthéon-Sorbonne – UMR CNRS 8215  
Trajectoires. De la sédentarisation  
à l'État

### GUILLAUME SIMIAND

Chercheur en humanités numériques,  
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne,  
Institut de recherche juridique  
de la Sorbonne (IRJS)

Dans cette optique, en septembre 2023, répondant à un appel à projets pédagogiques numériques de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, une équipe interdisciplinaire composée de deux archéologues et d'un expert en humanités numériques a lancé le projet ArchéoBot. Nous avons ainsi décidé de tirer parti des dernières avancées des IA conversationnelles tout en jugulant leurs limites, en particulier les « hallucinations<sup>1</sup> », la brièveté parfois excessive et décontextualisée des textes générés et, surtout, l'absence de traçabilité des sources et de transparence dans l'utilisation en aval des données disponibles dans la base de connaissance, deux problèmes rédhibitoires pour un usage pédagogique. Spécialement conçu pour le domaine des méthodes de l'archéologie, ArchéoBot a d'abord été pensé comme un moyen d'enrichir l'offre de formation en salle de classe et d'accompagner les étudiants, tant en licence qu'en master, dans leurs processus d'apprentissage et de révision.

### Méthodes de l'archéologie et pédagogie universitaire au XXI<sup>e</sup> siècle : la contribution d'ArchéoBot

L'enseignement des méthodes de l'archéologie fait face à plusieurs défis majeurs. D'une part, le domaine repose sur un vaste corpus de connaissances et de données empiriques, souvent dispersé dans de nombreuses publications spécialisées en plusieurs langues, ce qui peut rendre l'accès à l'information difficile pour les étudiants, surtout s'ils sont peu familiers avec le travail de recherche bibliographique. D'autre part, la nature même de la discipline, qui combine des aspects théoriques et pratiques, nécessite une approche pédagogique capable de transmettre non seulement des connaissances, mais aussi des méthodes d'analyse et d'interprétation. La diffusion de plus en plus large d'outils d'IA générative, mal adaptés au travail scientifique, peut en outre induire les étudiants en erreur et les pousser à acquérir de mauvaises habitudes du point de vue de la fiabilité des sources à un moment

où celle-ci est plus importante que jamais. ArchéoBot se penche ainsi sur les questions cruciales du contexte et de la pratique discursive des LLM disponibles, qui véhiculent trop souvent l'illusion d'une pensée structurée et objective. Face à une science contextuelle comme l'archéologie, ces limites sont particulièrement problématiques.

Avec notre outil, si un étudiant pose la question suivante : « Quelles sont les principales méthodes de prospection en archéologie ? », ArchéoBot fournit une réponse structurée, expliquant les différentes méthodes et technologies employées, mais surtout, il cite des sources précises issues de sa base de connaissances vectorielle (manuels de référence ou articles scientifiques récents).

### La structure de l'outil

ArchéoBot s'appuie sur la combinaison innovante de trois éléments clés, à savoir :

1. Les architectures RAG (*Retrieval-augmented generation*), qui associent à un modèle de langue avancé une base de données vectorielle. Cette dernière permet de représenter sous forme numérique une approximation du contenu sémantique des documents, ce qui améliore grandement les capacités de recherche du système en allant au-delà des approches basées uniquement sur des mots-clés.
2. Une décomposition de la question initiale (*skeleton of thought*), qui vise à pallier certains défauts des grands modèles de langue, notamment l'imprécision et la brièveté des réponses, en segmentant la tâche initiale et en parallélisant le traitement des fragments.
3. L'intégration de Zotero<sup>2</sup>, outil libre de gestion bibliographique largement adopté dans le milieu académique, qui permet aux utilisateurs de se concentrer sur la construction d'une bibliographie qualitative, sans se soucier de la gestion de la base de données.

1. L'habitude a été prise de nommer ainsi des productions de texte vraisemblables, mais entièrement erronées. Leur présence ne peut être entièrement éradiquée des grands modèles de langue actuels (*large language models*, LLM), mais différents dispositifs permettent de les limiter.

2. Pour Zotero, voir les articles : « Ouvrir les données de la Bibliothèque nationale de France à la recherche », *Culture et Recherche*, n° 144, printemps-été 2023, p. 30-33 ; Laurent Jonchère et Olivier Troccaz, « HALUR : des outils connectés à HAL au service des chercheurs », *Culture et Recherche*, n° 144, printemps-été 2023, p. 40-41.

×

Pour contribuer à l'amélioration du modèle, merci de laisser un feedback à la fin de la session!

Nouveau chat

Modèle

gpt-4-turbo

Nombre de documents convoqués par étape

10

Collections interrogées

Toutes collections

## Archéobot

Agent conversationnel | méthodes en archéologie

Peux-tu me fournir une explication détaillée des différentes méthodes de prospection en archéologie ? J'aimerais avoir une définition du terme "prospection" et par la suite comprendre les différentes techniques adoptées par les archéologues (pédestres, aériennes et géophysiques).

**Plan de la réponse:**

1. Définir la "prospection" en archéologie et son objectif principal.
2. Expliquer les méthodes de prospection par observation sans contact direct.
3. Détailler les techniques de prospection pédestre et leur mise en œuvre.
4. Présenter les principes et outils de la prospection aérienne.
5. Exposer les méthodes de prospection géophysique et leurs applications.
6. Mentionner les technologies spécifiques comme le LIDAR et leur utilité.
7. Discuter des avantages et des limites de chaque méthode de prospection.
8. Illustrer l'importance de l'intégration des données dans un SIG pour l'analyse.

Sources consultées

- Dabas 2018 = M. Dabas, *L'archéo-géophysique ou la détection et la cartographie des sites archéologiques*, in *Annales des Rencontres archéologiques de Saint-Céré*, 25, 2018, p. 117-124, <https://hal.science/hal-02188753>. [\[lien\]](#)
- Djindjian 2011 = F. Djindjian, *Chapitre 2 - Prévention et prospection archéologiques*, *Manuel d'archéologie*, Paris, 2011 (Collection U), p. 123-139. [\[lien\]](#)
- Djindjian 2017 = F. Djindjian, *Chapitre 2. Prévention et prospection archéologiques*, *L'archéologie*, Paris, 2017 (Hors collection), p. 131-147. [\[lien\]](#)
- Lehoërf - Giligny 2020 = A. Lehoërf, F. Giligny, *2 / Le travail de terrain*, Paris, 2020 (*Repères*), p. 40-98. [\[lien\]](#)
- Tabbagh 2018 = A. Tabbagh, *La prospection : évolution de la sous-discipline, évolution du métier*, in *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 42, 2018, p. 103-108, <https://journals.openedition.org/archeosciences/5440>. [\[lien\]](#)

« Des réponses structurées... »  
(capture d'écran des auteurs).

### Une interface versatile et transparente

Initialement conçu comme un simple agent conversationnel, ArchéoBot a rapidement transcendé cette fonction de base. Aujourd'hui, il intègre une base de données spécialisée dans plusieurs domaines de l'archéologie, contenant 900 documents

soigneusement sélectionnés pour leur qualité et pertinence, cumulant environ 90 millions de caractères. Cette base inclut des cours sous forme textuelle ou vidéo, des articles scientifiques, des ouvrages de référence, des *podcasts*, ainsi que des archives numérisées. Chaque texte généré par ArchéoBot est accompagné

« ... appuyées sur des données aux sources clairement identifiées »  
(capture d'écran des auteurs).

## 1. Définir la "prospection" en archéologie et son objectif principal.

La prospection archéologique, telle que définie dans les travaux de Djindjian (2017), englobe l'ensemble des méthodes et des techniques utilisées pour acquérir des informations sur l'occupation humaine d'un espace donné sans perturber le sol ou les structures présentes. Cette démarche se distingue de la fouille archéologique par son caractère non invasif et par l'étendue souvent vaste du terrain investigué (Tabbagh, 2018). L'objectif principal de la prospection est de localiser et de documenter les sites archéologiques, de cartographier les différentes occupations de l'espace à travers le temps, et d'évaluer des paramètres tels que la date, la surface, l'environnement et la démographie des sites archéologiques (Djindjian, 2011).

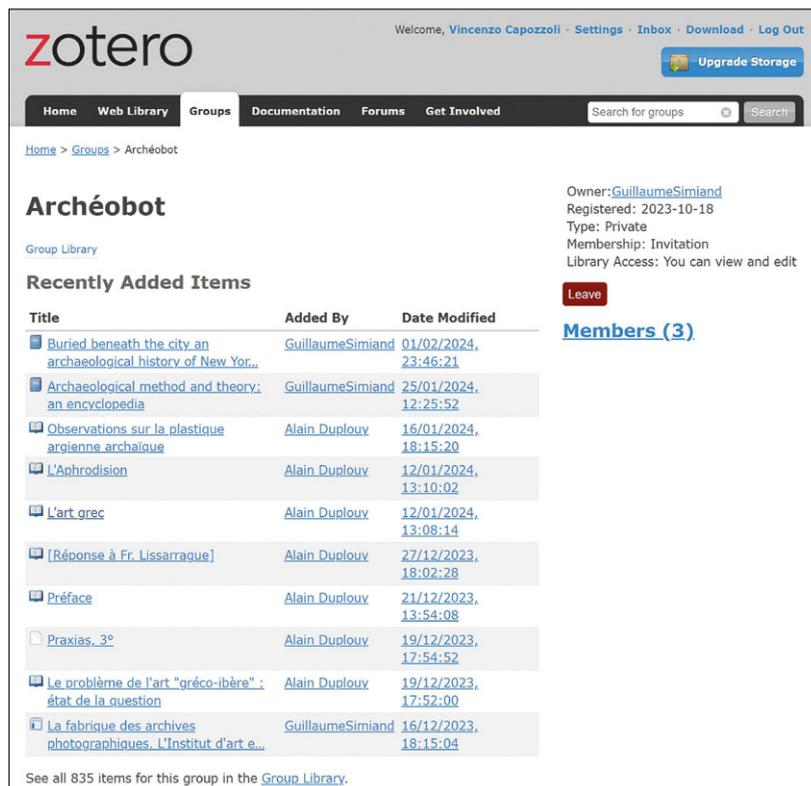
Les techniques employées varient grandement et peuvent inclure la prospection pédestre, où les chercheurs parcourent méthodiquement le terrain à la recherche de vestiges visibles à la surface, la prospection aérienne qui utilise des photographies prises depuis le ciel pour identifier des anomalies indiquant la présence de structures enfouies, et la prospection géophysique qui fait appel à des instruments mesurant les propriétés physiques du sous-sol pour détecter des anomalies (Djindjian, 2017). Ces méthodes peuvent être complétées par l'analyse de documents historiques, l'examen de toponymes, et l'utilisation de technologies avancées comme le LIDAR, qui permet de détecter des variations minimales dans la topographie d'un terrain, souvent masquées par la végétation ou d'autres éléments (Lehoërf, 2022).

La prospection archéologique est donc une étape cruciale dans la recherche archéologique, permettant de maximiser l'efficacité des fouilles tout en minimisant les perturbations des sites, et de fournir une vue d'ensemble des patterns d'occupation humaine sur de vastes zones, ce qui est essentiel pour la planification de recherches futures et la conservation du patrimoine archéologique.

Sources consultées pour cette section

- Djindjian 2011 = F. Djindjian, *Chapitre 1 - Les conditions de conservation et de découverte des sites et des objets archéologiques*, *Manuel d'archéologie*, Paris, 2011 (Collection U), p. 104-122. [\[lien\]](#)
- Djindjian 2011 = F. Djindjian, *Chapitre 2 - Prévention et prospection archéologiques*, *Manuel d'archéologie*, Paris, 2011 (Collection U), p. 123-139. [\[lien\]](#)
- Djindjian 2017 = F. Djindjian, *Chapitre 1. Les conditions de conservation et de découverte des sites et des objets archéologiques*, *L'archéologie*, Paris, 2017 (Hors collection), p. 111-130. [\[lien\]](#)
- Djindjian 2017 = F. Djindjian, *Chapitre 2. Prévention et prospection archéologiques*, *L'archéologie*, Paris, 2017 (Hors collection), p. 131-147. [\[lien\]](#)
- Lehoërf 2022 = A. Lehoërf, *Chapitre IV. Une minutieuse et ambitieuse enquête*, Paris cedex 14, 2022 (*Que sais-je ?*), p. 76-119. [\[lien\]](#)
- Tabbagh 2018 = A. Tabbagh, *La prospection : évolution de la sous-discipline, évolution du métier*, in *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 42, 2018, p. 103-108, <https://journals.openedition.org/archeosciences/5440>. [\[lien\]](#)

CULTURE ET RECHERCHE n°147 automne-hiver 2024 Recherche et intelligence artificielle 107



« Le recours à Zotero pour gérer la base de données bibliographiques allège le travail des experts de la discipline » (capture d'écran des auteurs).

de sa bibliographie. Cette dernière, qui pointe vers les documents source *via* des liens directs vers des bases externes lorsqu'elles sont disponibles, permet aux étudiants et aux enseignants de vérifier et d'approfondir les informations fournies. Cette « auditabilité » est au cœur de la logique de développement d'ArchéoBot. Enfin, ArchéoBot offre à ses utilisateurs plusieurs paramètres personnalisables, incluant le choix du LLM (avec des options telles que les GPT d'OpenAI, les modèles de MistralAI, et bientôt Llama 3 et Claude) ainsi que le nombre de documents à intégrer dans le système RAG. Grâce à cette approche, ArchéoBot place autant que possible son utilisateur aux commandes et tourne le dos à la logique de « boîte noire » trop souvent présente dans les interfaces d'IA générative.

### Perspectives

ArchéoBot est actuellement en phase de test et son développement se poursuit activement. Outre l'enrichissement de sa base bibliographique, il supportera de nouveaux modèles de langage, comme Llama 3,

dont le caractère partiellement ouvert assurera une mise en œuvre sans que les données ne sortent vers des systèmes externes. Une autre perspective de développement pour ArchéoBot sera sa mise en compatibilité avec les modèles multimodaux, notamment ceux consacrés à l'image, laquelle joue un rôle essentiel dans la démarche scientifique en archéologie : schémas, plans topographiques et dessins de mobilier. Cette intégration permettra également de mieux gérer les sources documentaires anciennes grâce à une gestion plus fine des opérations de numérisation. L'amélioration des techniques de segmentation des documents facilitera par ailleurs une meilleure préservation du contexte dans les publications scientifiques longues, repoussant ainsi les limites du système. Enfin, l'optimisation de l'architecture contribuera à limiter les coûts de fonctionnement et la charge de calcul, en réduisant l'empreinte environnementale du projet et en le rendant accessible à un plus grand nombre d'étudiants et de chercheurs.

Au-delà des aspects techniques, l'éventuelle intégration d'ArchéoBot dans l'enseignement soulève des questions plus larges sur la transformation de la pédagogie et des pratiques universitaires à l'ère des IA génératives. Dans cet univers à l'évolution extrêmement rapide, l'utilisation de tels systèmes soulève de nombreuses questions éthiques et épistémologiques. Comment un tel outil modifie-t-il la relation entre l'enseignant et l'étudiant, selon que l'utilisateur soit l'un ou l'autre ? Comment garantir que les étudiants développent une pensée critique et ne deviennent pas dépendants de l'outil ? Comment ArchéoBot pourra-t-il maximiser le signal dans les textes qu'il génère et minimiser le bruit à faible valeur ajoutée ?

La construction de nouveaux savoirs n'est pas un processus anodin. Cependant, nous croyons qu'ArchéoBot, en s'appuyant sur une base de données scientifique vérifiable et en se préparant à intégrer des modèles multimodaux, participera inévitablement à une rupture dans la production des savoirs déjà amorcée par les IA génératives. En établissant des connexions inattendues entre ses sources et en obligeant enseignants et étudiants à une confrontation constante, ArchéoBot finira par entraîner des changements significatifs tant dans l'enseignement de l'archéologie que dans la manière dont les étudiants perçoivent cette discipline, ouvrant ainsi la voie à des nouvelles formes de pédagogie et, *in fine*, à un changement épistémologique majeur de cette science éminemment humaine. ■

### Bibliographie et sitographie

Vincenzo Capozzoli, Alain Duploux, François Giligny et Guillaume Simiand, « ArchéoBot, le chatbot », *La collection numérique*, n° 30, 2023, p. 48-49.

« ArchéoBot : un compagnon intelligent et vérifié pour explorer l'archéologie et ses méthodes avec LangChain », *Observatoire IA*, 3 décembre 2023 (<https://observatoire-ia.pantheonsorbonne.fr/actualite/archeobot-compagnon-intelligent-et-verifie-explorer-larcheologie-et-ses-methodes>, site consulté le 8 juillet 2024).

« Peut-on réviser les cours avec ArchéoBot ? », *SUN Paris 1*, 4 mars 2024 (<https://pedagogie-numerique.pantheonsorbonne.fr/actualite/peut-reviser-cours-archeo-bot>, site consulté le 8 juillet 2024).

Guillaume Simiand, Vincenzo Capozzoli et Alain Duploux, « ArchéoBot : vers une pédagogie interactive et inclusive en archéologie grâce à l'IA générative », conférence tenue lors des Journées d'études sur l'intelligence artificielle (JEDDAME), Toulouse, 14 et 15 mars 2024 (<https://hal.science/hal-04503459>, site consulté le 12 juillet 2024).

Page de droite : « L'interface est compatible avec Moodle, le LMS le plus utilisé dans l'enseignement supérieur en France » (capture d'écran des auteurs).

✕

Pour contribuer à l'amélioration du modèle, merci de laisser un feedback à la fin de la session!

Nouveau chat

Modèle

gpt-4-turbo

Nombre de documents convoqués par étape

10

Collections interrogées

Toutes collections ✕

# Archéobot

Agent conversationnel | méthodes en archéologie

Posez-moi une question relative à l'archéologie. ➤

✕

Pour contribuer à l'amélioration du modèle, merci de laisser un feedback à la fin de la session!

Nouveau chat

Modèle

gpt-4-turbo

Nombre de documents convoqués par étape

10

Collections interrogées

Toutes collections ✕

# Archéobot

Agent conversationnel | méthodes en archéologie

Modèle

- gpt-4-turbo
- mistral-medium-latest
- mixtral8x7b
- mistral-large-latest

Nombre de documents convoqués par étape

- 10
- 5
- 8
- 10
- 15
- 20
- 30
- 40
- 50





# Se positionner face aux enjeux et défis

**Réponse de ChatGPT à la question  
(prompt) suivante : « génère une  
image te représentant toi-même »,  
avril 2024**

CCO – Don universel domaine public :  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:How\\_ChatGPT\\_visualizes\\_itself.webp?uselang=fr](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:How_ChatGPT_visualizes_itself.webp?uselang=fr)

# Perspectives de cybersécurité des systèmes d'intelligence artificielle dans les secteurs culturels

Le recours croissant aux systèmes d'intelligence artificielle par les acteurs culturels, au sein de projets des institutions ou en tant que nouveau support des œuvres par l'IA générative, constitue des opportunités sur le plan de la création que la littérature académique a aujourd'hui bien démontrées. Toutefois, l'utilisation de ces technologies, parfois peu ou mal maîtrisées, ouvre la voie à de nouveaux risques de sécurité et peut engendrer des vulnérabilités susceptibles d'être exploitées de façon malveillante.

### NATHAN MARCEL-MILLET

Chef de cabinet, Délégation générale à la transmission, aux territoires et à la démocratie culturelle, ministère de la Culture

Au-delà de l'acception stricte de cybersécurité entendue comme rupture de confidentialité, d'intégrité et de disponibilité des données, il sera admis que la sécurité des Systèmes d'intelligence artificielle (SIA) peut avoir des effets de bords plus larges, notamment sur les contenus culturels, et ceci alors que les enjeux liés à la désinformation marquent un tournant majeur dans l'ajustement des politiques culturelles.

### Les enjeux de cybersécurité de l'intelligence artificielle

La littérature académique déploie aujourd'hui les liens entre l'intelligence artificielle et la cybersécurité autour de trois enjeux : la cybersécurité des systèmes d'intelligence artificielle d'une part, l'utilisation de l'IA pour renforcer la cybersécurité d'autre part, et enfin les usages malveillants de l'IA comme nouveaux vecteurs d'attaques.

La cybersécurité de l'intelligence artificielle recouvre l'ensemble des enjeux afférents aux vulnérabilités propres à ces systèmes et aux mesures, y compris l'élaboration de standards, qui œuvrent à assurer un niveau de sécurité minimal tout au long du développement de ces systèmes, dans le respect des principes de confiance ou de robustesse tels qu'établis par le règlement européen adopté en avril 2024<sup>1</sup>. En effet, des vulnérabilités propres aux SIA ont été observées, à l'instar de l'empoisonnement de données<sup>2</sup>, de l'extraction de données<sup>3</sup> ou des attaques adverses<sup>4</sup>. Aussi, des normes de cybersécurité doivent permettre de protéger l'ensemble du cycle de vie d'un SIA, depuis son modèle et les données d'entraînement jusqu'aux phases de déploiement et de production<sup>5</sup>.

L'intelligence artificielle, en deuxième lieu, présente une opportunité nouvelle pour renforcer la cybersécurité des infrastructures numériques. De nombreux cas d'usage sont aujourd'hui proposés, dans les champs de la détection de vulnérabilités ou de menaces sur les systèmes d'information des institutions, ainsi qu'au cours du traitement d'une attaque, de son analyse jusqu'à l'atténuation de ses effets (*mitigation*). Les outils d'IA, au regard de leur capacité d'amélioration continue et de leur analyse, peuvent dès lors jouer un rôle fondamental dans l'automatisation de la détection d'attaques et permettre une plus grande réactivité dans la réponse apportée.

Enfin, en miroir, l'intelligence artificielle constitue un nouveau vecteur pour produire et amplifier des cyberattaques. Des acteurs malveillants peuvent avoir recours à des SIA pour concevoir une attaque ou pour en accroître l'impact. Dans cette perspective, l'IA offre des opportunités pour les acteurs malveillants en leur permettant d'affiner les techniques d'ingénierie sociale et d'imiter les interactions humaines, à l'instar du développement des techniques d'hypertrucage (*deepfake*). En outre, le développement des capacités de certains outils d'IA pour réaliser des tâches jusqu'alors réservées aux humains (résoudre un CAPTCHA par exemple) est de nature à affaiblir le niveau général de sécurité des applications logicielles.

### Des risques spécifiques des données dans les usages de l'IA

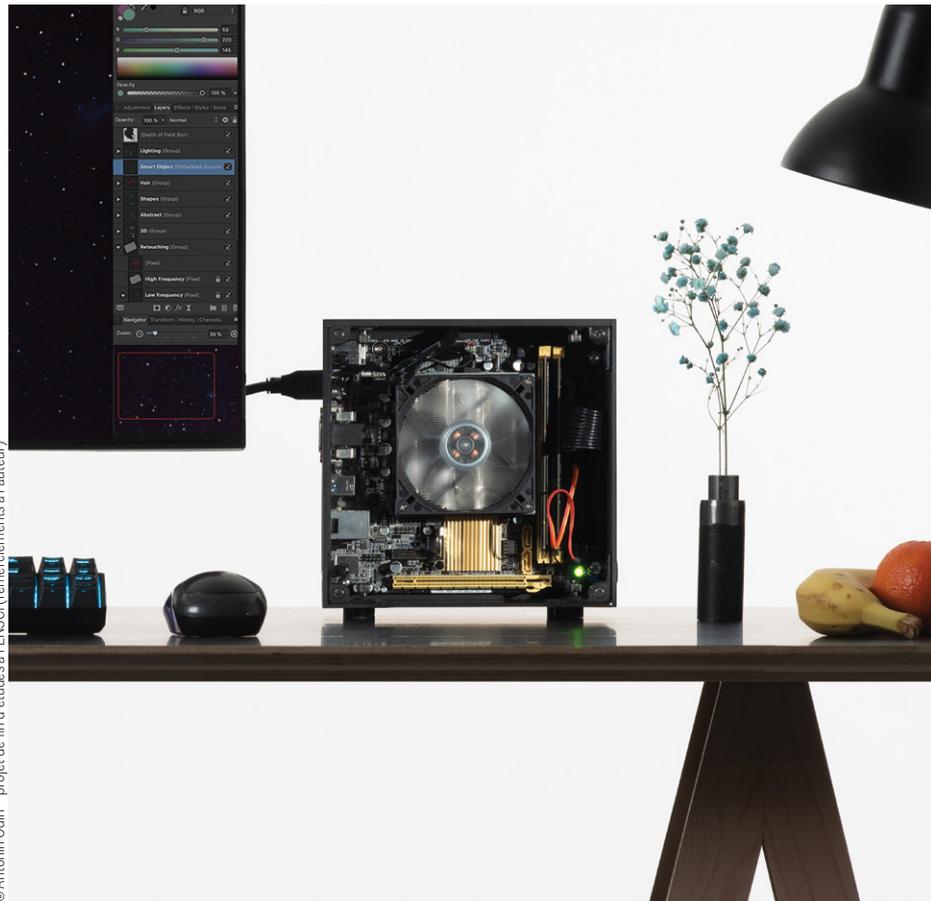
L'un des enjeux mis en lumière par la démocratisation de l'IA générative résulte de l'utilisation d'outils fondés sur de nombreuses données d'entraînement. Les modalités de recueil de ces

1. Règlement européen sur l'IA (AI Act), publié au JOUE le 13 juin 2024 : [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0138-FNL-COROI\\_FR.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0138-FNL-COROI_FR.pdf) (site consulté le 22 juillet 2024). Voir dans ce numéro l'article de David Pouchard, « Droit d'auteur et IA générative : vers une éthique de la transparence », p. 115.
2. L'attaquant introduit des fausses données et interrompt l'arrivée des « vraies » données.
3. L'attaquant envoie des échantillons de données et analyse des résultats pour répliquer le modèle.
4. L'attaquant manipule des données qui sont fournies aux systèmes IA en vue d'assurer qu'elles soient mal classées.
5. Guide de l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI), *Recommandations de sécurité pour un système d'IA générative*, 29 avril 2024.

données autant que leur exploitation dans le cadre du modèle d'entraînement témoignent des risques en matière de confidentialité. En ce sens, des mauvaises configurations ou une sécurité insuffisante dans la phase d'entraînement sont susceptibles d'engendrer des pertes de confidentialité sur ces données, et ceci avec des conséquences importantes, de surcroît s'il s'agit de données personnelles. La Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) relève notamment le développement de techniques de reconstruction ou d'inférence d'appartenance de ces données sur certains SIA.

Sur le plan de l'intégrité, les modèles d'entraînement peuvent engendrer, en sortie des modèles d'IA, des fausses informations susceptibles d'entraîner une rupture de confiance des utilisateurs. Le modèle est en effet conçu pour générer des réponses sur la base des données à partir desquelles la phase d'entraînement a pu se conduire. Or les « attaques adverses »<sup>6</sup> constituent l'un des modes d'attaques sur les SIA les plus documentés. Ces attaques sont caractérisées par l'injection de fausses données d'entrées et leur objectif vise à tromper l'algorithme d'apprentissage automatique qui produira, en sortie, des faux résultats.

Pouvant agir sur la confiance légitime des utilisateurs, le rôle dévolu aux SIA doit être envisagé dans son rapport aux effets de la désinformation dans la société. Un cas d'usage aujourd'hui fréquent sur les réseaux sociaux consiste en l'observation de « bots » qui, à partir de *prompts* programmés par des acteurs politiques, offrent en masse des réponses orientées aux différentes publications (voir illustration ci-dessous). Le caractère massif de ces réponses générées par des robots entraîne la croyance, pour certains internautes, en l'idée qu'un nombre important de personnes adhère à une certaine opinion<sup>7</sup>. Ce détournement des usages de l'IA à des fins politiques ou idéologiques est notamment observé dans leur incidence sur la formation de l'opinion publique européenne et, partant, sur leur impact démocratique<sup>8</sup>.



©Antonin Odin - projet de fin d'études à l'ENSCI (remerciements à l'auteur)

« ComputerKIT ».

### Cas d'usage prospectif de risques cyber liés à l'IA dans les secteurs culturels

Les secteurs culturels ont pris la mesure des opportunités offertes par l'IA, comme en témoignent les développements récents dans les domaines de la création artistique, mais aussi du patrimoine et de la diffusion et des recommandations culturelles. De surcroît, l'accélération des processus de numérisation des biens culturels et des œuvres, qu'il s'agisse des livres, des archives, des arts visuels ou des données archéologiques, ouvrent des fenêtres de vulnérabilités nouvelles pour les cyberattaques. La surface d'attaque s'accroît à mesure que la dépendance critique des acteurs culturels à certains prestataires augmente. L'attaque sur le prestataire de logiciel de billetterie du spectacle vivant Sirius, en juillet 2024, témoigne de la dépendance de tout un secteur à un seul acteur qui, dès lors, occupe une position critique dans la chaîne d'approvisionnement logicielle (*software supply chain*) des secteurs culturels.

Au regard des enjeux identifiés précédemment, le secteur culturel comporte des données susceptibles d'intéresser au premier rang de potentiels attaquants. Les algorithmes de recommandation reposent en effet sur des SIA dont les données personnelles des utilisateurs sont les premiers carburants. Si des attaques sur des SIA culturels n'ont aujourd'hui pas été relevées publiquement, une attention particulière sur certains cas d'usage doit permettre d'anticiper les risques auxquels les secteurs culturels pourront être confrontés. Par exemple, il est plausible d'imaginer que, pour les

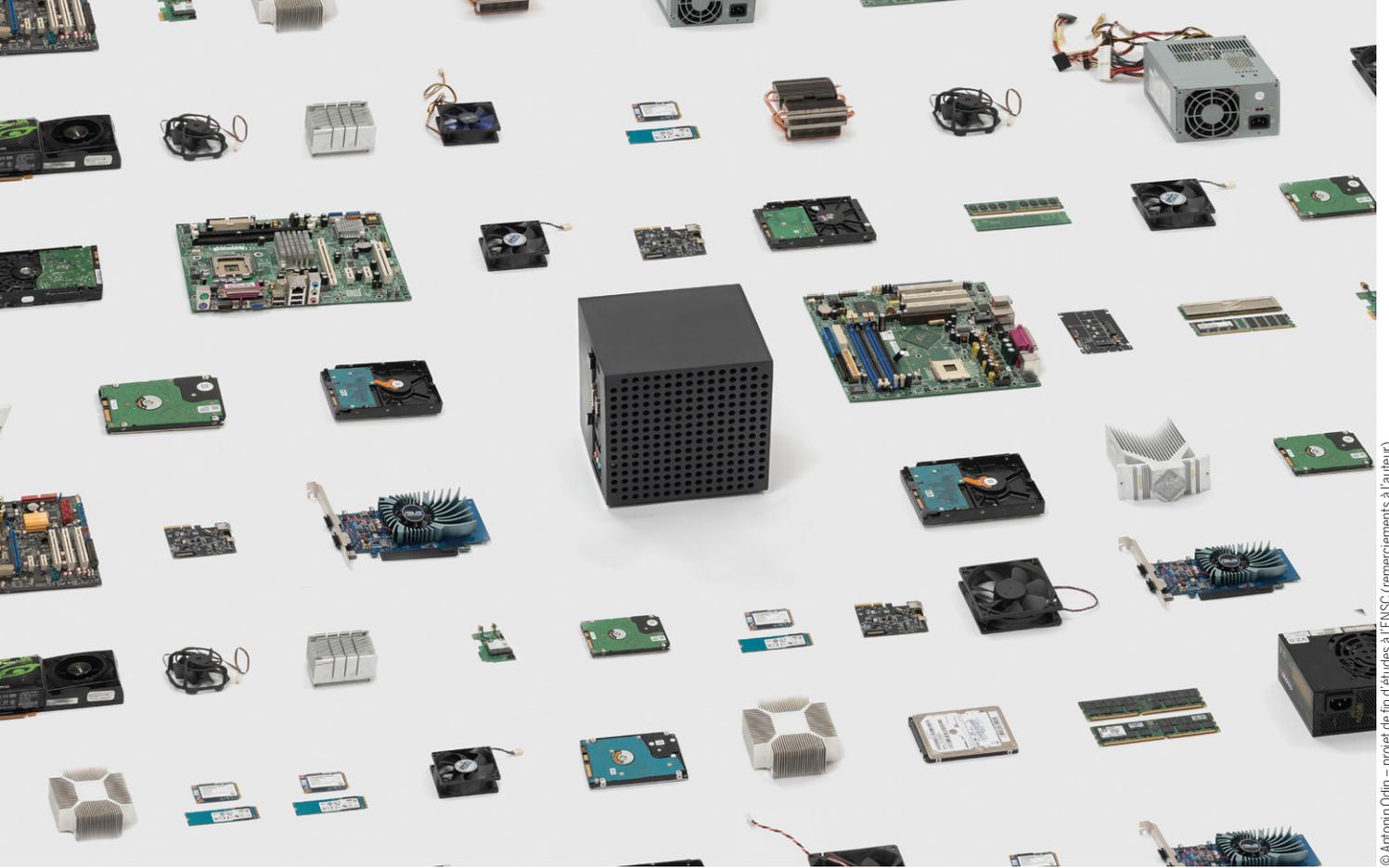


Réponse automatisée d'un bot sous un article de presse.

6. Une attaque adverse (*adversarial attack*), parfois aussi appelée « attaque antagoniste » ou « attaque par exemples contradictoires » vise à envoyer à un système d'IA une ou plusieurs requêtes malveillantes dans le but de tromper ou d'altérer son bon fonctionnement (ANSSI).

7. David Chavalarias, *Toxic Data. Comment les réseaux manipulent nos opinions*, Flammarion, 2 mars 2022.

8. Projet COMPROM, *Computational Propaganda: Investigating the Impact of Algorithms and Bots on Political Discourse in Europe*, Université d'Oxford. Voir : <https://culture.ec.europa.eu/funding/culture-funding-guide/case-studies/comprom> (site consulté le 22 juillet 2024).

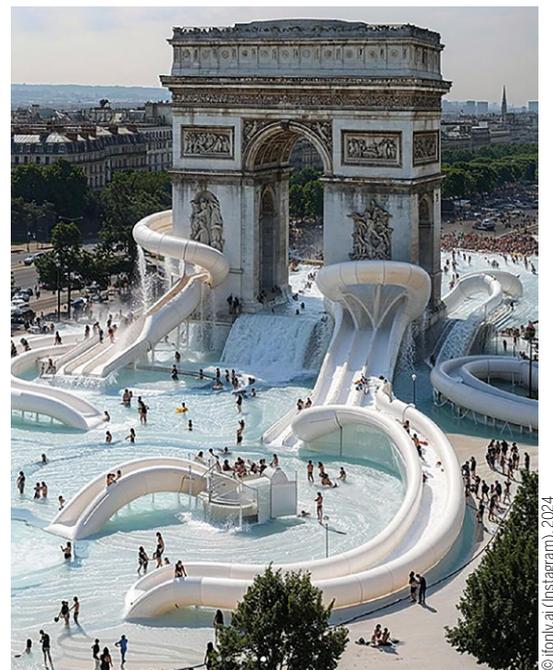


© Antonin Odin – projet de fin d'études à l'ENSC (remerciements à l'auteur)

« ComputerKIT ».

organismes de gestion collective, l'automatisation de la gestion des droits (enregistrement des œuvres, suivi de leur utilisation, collecte des redevances et distribution aux créateurs) pourrait, en cas d'attaques, se révéler particulièrement critique à plusieurs niveaux : modifications des métadonnées ; manipulation des statistiques d'utilisation de certaines œuvres, perte de confiance des ayants droit, etc. De même, la cartographie des sites de fouilles archéologiques et les artefacts découverts peuvent susciter un intérêt de premier plan pour des attaquants de nature diverse.

En synthèse, si le développement de l'intelligence artificielle fait l'objet d'attaques sur les secteurs les plus critiques aujourd'hui, les acteurs culturels et les données dont ils disposent doivent être conscients des risques cyber qui pèsent sur le développement des SIA. Les normes établies par les autorités de régulation, en France comme à l'échelle européenne, esquissent les briques pour un développement sécurisé permettant des pratiques responsables et garantes de la confiance des publics dans leur usage. ■



© ifonly.at (Instagram), 2024

« If only Paris could be a giant pool party », Art/Prompts.

**Pour en savoir plus :**

CNIL, « IA : garantir la sécurité du développement d'un système d'IA », 10 juin 2024. <https://www.cnil.fr/ia-garantir-la-securite-du-developpement> (site consulté le 22 juillet 2024).

Guide ANSSI, « Recommandations de sécurité pour un système d'IA générative », 29 avril 2024. <https://cyber.gouv.fr/publications/recommandations-de-securite-pour-un-systeme-dia-generative> (site consulté le 22 juillet 2024).

European Union Agency for Cybersecurity, « Artificial intelligence and cybersecurity research », 7 juin 2023. <https://www.enisa.europa.eu/publications/artificial-intelligence-and-cybersecurity-research> (site consulté le 22 juillet 2024).

Norme internationale ISO/IEC 42001 relative au « système de management pour l'intelligence artificielle », publiée en décembre 2023.

Laboratoire d'innovation numérique de la CNIL (LINC), dossier « Intelligence artificielle », 6 janvier 2022. <https://linc.cnil.fr/dossier-intelligence-artificielle> (site consulté le 22 juillet 2024).

# Droit d'auteur et IA générative : vers une éthique de la transparence

Les questions soulevées par les performances accrues des systèmes d'IA générative se sont récemment imposées au cœur du débat public. Ces systèmes se révèlent désormais capables d'accomplir une très grande variété de tâches, en particulier de créer des contenus synthétiques, à partir de grandes quantités de données culturelles existantes. Cette capacité de production constitue un tournant majeur de l'IA et paraît de nature à raviver les enjeux tenant au respect de la propriété intellectuelle.



*The Analysis of Beauty* par William Hogarth (1753, don de Sarah Lazarus en 1891). Inv. n° 91.1.124 : <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/404838> (domaine public).

L'IA dite « générative » permet de générer des textes, des images, des sons, des vidéos ou d'autres médias en réponse directe à des instructions simples en langage naturel formulées par l'utilisateur (*prompts*).

La modélisation de l'IA générative implique une phase préalable d'apprentissage automatique (*machine learning*) pendant laquelle les systèmes se nourrissent

d'un vaste ensemble de données qui vont servir à leur entraînement et leur permettre d'inférer des règles et de générer ensuite des contenus.

Les œuvres de l'esprit étant moissonnées en masse dans ce cadre, il importe de s'interroger sur les conditions d'application du cadre existant en matière de droit d'auteur et de droits voisins.

## DAVID POUCHARD

Adjoint à la cheffe du bureau de la propriété intellectuelle, sous-direction des affaires juridiques, Service des affaires juridiques et internationales, secrétariat général, ministère de la Culture

### Le cadre juridique applicable

En 2020, le Conseil supérieur de la propriété littéraire et artistique (CSPLA) a publié un rapport précurseur sur les enjeux juridiques et économiques de l'IA dans les secteurs culturels. Ce rapport s'est notamment interrogé sur le statut des œuvres dont se nourrit l'IA<sup>1</sup>.

Il relève que la mise en mémoire des œuvres utilisées pour nourrir l'algorithme d'apprentissage automatique constitue le plus souvent un acte de reproduction. Cet acte en amont d'ingestion par l'IA donne donc prise au monopole d'exploitation des titulaires de droits et suppose l'obtention de leur consentement.

Le rapport évoque néanmoins les possibles exceptions au monopole conféré par le droit d'auteur. Il envisage, en particulier, la pertinence des exceptions sur la « fouille de textes et de données » (*text and data mining*), issues de la directive 2019/790 du 17 avril 2019 sur le droit d'auteur et les droits voisins dans le marché unique numérique.

La première exception, réservée au secteur académique, bénéficie aux organismes de recherche et aux institutions du patrimoine culturel qui effectuent des fouilles à des fins de recherche scientifique. Essentielle à la recherche académique, l'exception ne peut faire l'objet d'un aménagement contractuel et les ayants droit ne peuvent s'y opposer. La seconde exception est ouverte à tous les usages, quelle que soit la finalité, y compris commerciale, sous réserve toutefois que le titulaire n'ait pas exprimé son opposition (*opt-out*).

Bien que la directive ait été adoptée en 2019, à une période où l'IA générative n'avait pas encore pris l'ampleur qu'on lui connaît désormais, un courant majoritaire estime aujourd'hui que ces deux exceptions constituent le cadre juridique de l'entraînement des modèles d'IA.

Le Règlement établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle (RIA) du 13 juin 2024 paraît conforter cette analyse en établissant, dans son considérant 105, un lien direct entre les techniques de fouille de textes et de données et l'utilisation des œuvres dans les bases d'apprentissage et de spécialisation des systèmes d'IA<sup>2</sup>.

Les exceptions de fouille de textes et de données permettent d'assurer aux acteurs qui recourent à l'IA une certaine sécurité juridique en établissant une forme de présomption de consentement des titulaires de droits au versement de leurs œuvres dans le processus d'apprentissage.

Ces exceptions, transposées en France par l'ordonnance n° 2021-1518 du 24 novembre 2021<sup>3</sup>, ne confèrent pas pour autant des autorisations d'exploitation sans conditions aux fournisseurs de modèles d'IA.

D'abord, seul le droit de reproduction est concerné et aucune communication au public, même partielle, des contenus fouillés n'est permise. L'opération de fouille de données visant à déconstruire les données entrantes en vue de construire un résultat étranger à la donnée initiale, les œuvres utilisées pour l'entraînement d'un modèle d'IA ne sauraient être communiquées au public en tant que telles, même partiellement, que ce soit en amont, au cours de la phase d'entraînement, ou en aval, lors de la génération des contenus.

Ensuite, l'exception est soumise à l'exigence d'un accès licite aux contenus protégés, par un contrat, un abonnement ou une autre voie légale. L'entraînement des modèles d'IA peut ainsi être réalisé à partir des œuvres mises à disposition du public sur Internet (*web-scraping*), sous réserve que l'accès aux contenus concernés se fasse de manière licite.

Enfin, les titulaires de droits peuvent exprimer leur opposition à toute opération de fouille de leurs œuvres, de manière appropriée, notamment par des procédés lisibles par machine pour les contenus mis à la disposition du public en ligne. Lorsqu'une telle opposition est exprimée, les fournisseurs de modèles d'IA doivent obtenir une autorisation des titulaires de droits s'ils souhaitent procéder à un entraînement sur leurs œuvres. Ce retour à l'exclusivité permet aux auteurs de recouvrer une capacité de négociation en vue d'obtenir une rémunération.

Les conditions de mise en œuvre de ce cadre, et plus particulièrement de ce droit d'opposition, ont été au cœur des récents débats qui ont accompagné l'adoption du RIA.

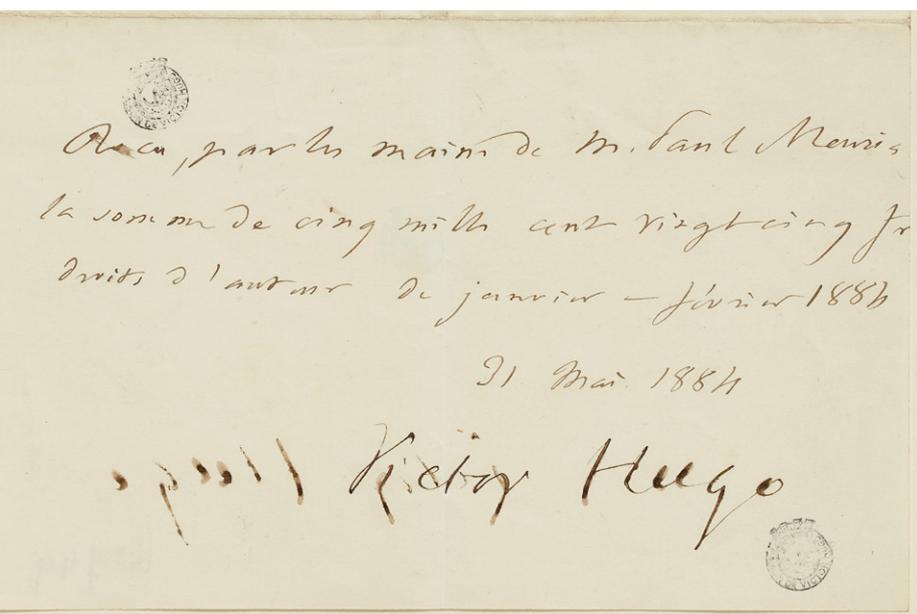
### L'enjeu de la transparence sur les données d'entraînement

Le RIA intègre en son article 53 une obligation pour les fournisseurs de modèles d'IA à usage général de mettre en place, à compter du 2 août 2025, une politique visant à se conformer au droit de l'Union européenne en matière de droit d'auteur, et notamment à identifier et à respecter, y compris au moyen de technologies

1. [file:///C:/Users/catherine.graindorge/Downloads/CSPLA-Rapport-complet-IA-Culture\\_janv2020.pdf](file:///C:/Users/catherine.graindorge/Downloads/CSPLA-Rapport-complet-IA-Culture_janv2020.pdf) (site consulté le 22 juillet 2024).

2. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401689](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401689) (site consulté le 22 juillet 2024).

3. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000044362034> (site consulté le 22 juillet 2024).



Pièce manuscrite de Victor Hugo, Paris le 31 mai 1885, Maison de Victor Hugo – Hauteville House, Inv. n° ah749 : <https://www.parismuseescollections.paris.fr/fr/maison-de-victor-hugo/oeuvres/recu-victor-hugo-a-paul-meuris-pour-la-somme-de-5-125-f-de-droits-d#infos-principales> (CCO 1.0 Universel).

de pointe, l'éventuelle opposition exprimée par les ayants droit<sup>4</sup>.

Le règlement pose également l'obligation pour les fournisseurs d'élaborer et de rendre disponible publiquement un « résumé suffisamment détaillé » des données ayant servi à l'entraînement de leur modèle, conformément à un modèle fourni par le Bureau de l'IA<sup>5</sup>.

Cette transparence sur les sources ayant permis l'entraînement des systèmes d'IA en amont s'avère primordiale pour permettre aux titulaires de droits de s'assurer que leurs œuvres ont été obtenues de manière licite et de vérifier la prise en compte de leur opposition éventuelle à l'usage de leurs œuvres à des fins d'entraînement.

Tout en tenant dûment compte de la nécessité de protéger les secrets d'affaires et les informations commerciales confidentielles, ce résumé devra être « généralement complet en termes de contenu plutôt que détaillé sur le plan technique » (considérant 107). Par ailleurs, cette obligation de transparence ne s'applique ni aux modèles spécialisés, ni aux modèles à usage général utilisés pour des activités de recherche, de développement ou de prototypage avant leur mise sur le marché. En revanche, elle concerne les fournisseurs établis hors de l'Union européenne qui mettent sur le marché des modèles d'IA à usage général dans l'Union.

Le rapport de la Commission de l'intelligence artificielle, rendu public en mars 2024, préconise de mettre en œuvre et d'évaluer les obligations de transparence prévues par le RIA en encourageant le développement de standards et d'une infrastructure adaptée<sup>6</sup>.

Pour répondre à cet enjeu, la ministre de la Culture a mandaté le CSPLA afin qu'il conduise deux missions :

- la première est destinée à expertiser la portée de l'obligation de transparence prévue à l'article 53 du RIA et à établir la liste des informations qui devraient nécessairement être rendues publiques par les fournisseurs d'IA, selon les secteurs culturels concernés, pour permettre aux titulaires de droits d'exercer leurs droits. Les résultats de cette première mission sont attendus d'ici la fin de l'année 2024 ;
- la deuxième mission fera le point sur les mécanismes envisageables pour que dans chaque secteur les ayants droit aient la garantie de l'effectivité de leurs droits lors de l'utilisation de leurs œuvres par les fournisseurs d'IA. Il s'agira aussi d'analyser les enjeux économiques sous-jacents à l'accès aux données culturelles et patrimoniales lorsque celles-ci sont utilisées par les IA. Les conclusions de cette seconde mission sont prévues pour 2025.

Ayant pris acte des inquiétudes exprimées tant par les développeurs de modèles d'IA, concernant l'accès aux données nécessaires pour entraîner leurs modèles, que par les ayants droit, s'agissant du respect de leurs droits, l'Autorité de la concurrence considère, dans un avis du 28 juin 2024, que « les autorités publiques,



Centre culturel de Belém à Lisbonne, 2015.

© Alvesgaspar (CC-BY-SA-4.0) : [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/File:Wall\\_April\\_2015-4a.jpg](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/File:Wall_April_2015-4a.jpg)

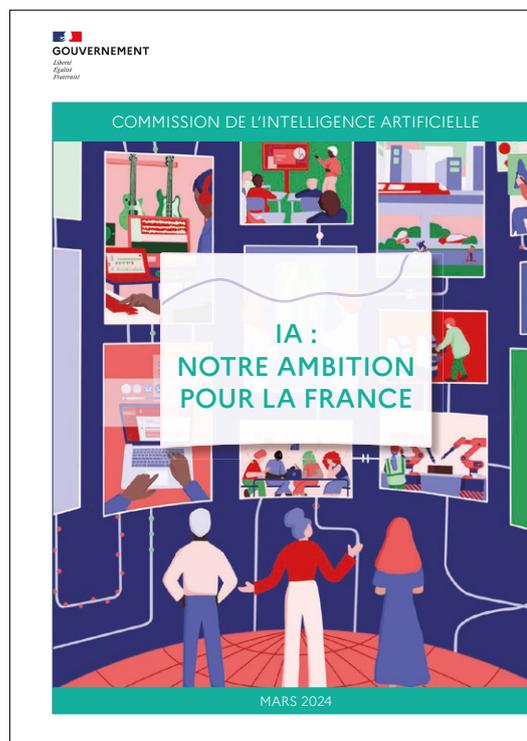
notamment dans le cadre de la mission confiée par la ministre de la Culture au Conseil supérieur de la propriété littéraire et artistique, pourraient inciter les ayants droit à tenir compte de la valeur économique des données selon les cas d'usage (en introduisant par exemple des prix différenciés) et à proposer des offres groupées réduisant les coûts de transactions, ceci afin de garantir les capacités d'innovation des développeurs de modèles<sup>7</sup> ». *In fine*, il conviendra que les modèles d'affaires à venir soient équitables et qu'ils intègrent bien la rémunération des ayants droit. ■

4. Dans sa décision n° 24-D-03 du 15 mars 2024, l'Autorité de la concurrence a ainsi établi que la société Google avait utilisé, aux fins d'entraînement de son modèle d'IA, des contenus des éditeurs et agences de presse, sans les avertir et sans leur offrir la possibilité effective d'exercer leur droit de retrait.

5. Créé le 24 janvier 2024 au sein de la Commission européenne, le Bureau européen de l'IA aura notamment pour missions d'élaborer le modèle de résumé détaillé et de contrôler les codes de bonnes pratiques visant à respecter le droit d'auteur.

6. <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/09/4d3cc456d2f5b9d79ee75fee63b47f10d75158.pdf> (site consulté le 22 juillet 2024).

7. <https://www.autoritedelaconcurrence.fr/fr/avis/relatif-au-fonctionnement-concurrentiel-du-secteur-de-lintelligence-artificielle-generative> (site consulté le 22 juillet 2024).



Première de couverture du rapport de la Commission de l'intelligence artificielle, « IA : notre ambition pour la France », Paris, 13 mars 2024.

# Normes harmonisées en IA : sciences et techniques au service de la réglementation européenne

Peu connus du grand public bien qu'ouverts à tous, des comités de normalisation rédigent aujourd'hui les spécifications techniques qui permettront d'ici deux ans l'application pratique de la réglementation européenne sur l'IA. Ces travaux ambitieux, dont l'impact sociétal et économique s'annonce majeur, s'avèrent thématiquement très proches des intérêts et des bonnes pratiques de la communauté scientifique. L'opportunité d'une synergie ?

## LAURIANE AUFRANT

Chercheuse à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (INRIA), experte auprès du comité européen de normalisation sur l'IA, présidente du groupe International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC) sur le traitement automatique du langage naturel

L'AI Act, règlement européen sur l'IA, a été publié au *Journal officiel de l'Union européenne* (UE) le 12 juillet 2024<sup>1</sup>. Bien connu des milieux culturels au titre des débats sur les droits d'auteur, son impact sera en pratique majeur dans de nombreux aspects de la société et de l'économie européennes : santé, ressources humaines, éducation, justice, infrastructures critiques ne sont que quelques exemples de la longue liste de

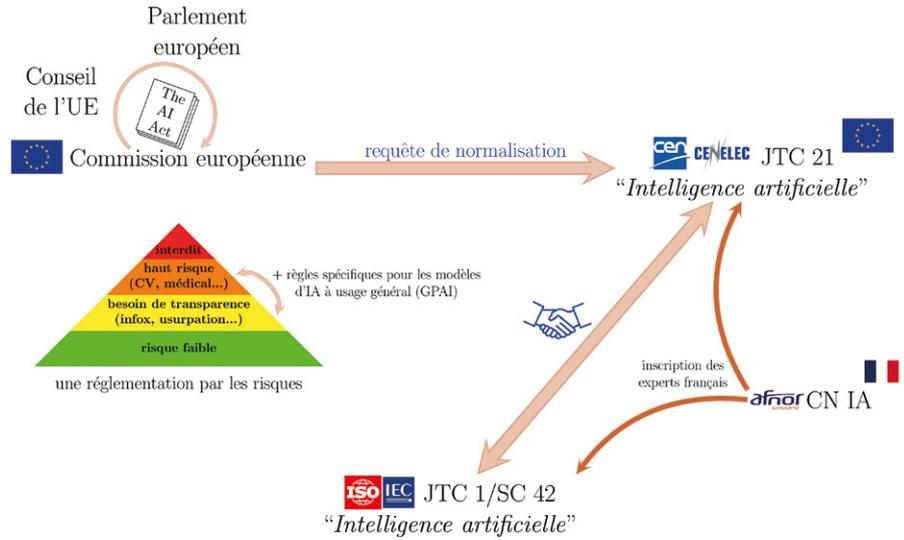
secteurs qui ont désormais deux ans pour vérifier leurs pratiques afin de garantir un usage raisonné de l'IA. C'est en effet le 2 août 2026 que s'appliquera le cœur technique de cette réglementation, les exigences applicables aux systèmes d'IA à haut risque ; les interdictions et les règles pour les modèles d'IA à usage général interviendront dès 2025, et certains secteurs attendront 2027.

1. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL\\_202401689](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL_202401689)



Les normes harmonisées établiront des règles techniques claires de supervision humaine pour les usages médicaux de l'IA, 2021 (<https://www.pexels.com/fr-fr/photo/homme-technologie-debout-rechercher-8439063/>).

Si cette publication s'apparente à un achèvement, ce n'est en fait que le début d'un voyage. L'article 40 de l'*AI Act* prévoit en effet de mandater des organismes européens de normalisation pour détailler les aspects techniques de ces règles générales : c'est le CEN-CENELEC (comité JTC 21<sup>2</sup> sur l'intelligence artificielle) que la Commission européenne a choisi<sup>3</sup>. Ces spécifications techniques appelées « normes harmonisées » visent à apporter non pas des contraintes mais des options : offrir de la clarté légale aux développeurs (PME notamment) en leur donnant le choix de suivre un ensemble d'instructions simples et claires pour garantir que leurs produits sont en règle, sans avoir besoin de mener eux-mêmes une analyse juridique de l'*AI Act*. Ces travaux normatifs, en étroite interaction avec le réglementaire, sont menés par des groupes de travail ouverts à tous, dont de nombreux bénévoles et la société civile, dans un souci d'amélioration continue de la représentativité des diverses parties prenantes.



L'entrée en application de l'*AI Act*, fruit de la collaboration de multiples acteurs (graphique fourni par l'auteurice, libre de droits).



© CEN-CENELEC

Les délégations européennes en session plénière, juin 2024 à l'Université de Bath.

### Une feuille de route normative bien remplie

En réponse aux dix thèmes de travail déjà mandatés par la Commission européenne, le programme de travail du JTC 21 en incubation depuis 2021 s'oriente vers une organisation en quatre normes principales servant de points d'entrée en fonction du profil du lecteur et de l'article de l'*AI Act* visé : suivre la norme dédiée au système de gestion des risques donnera présomption de conformité à l'article 9, celle sur

le système de gestion de la qualité sera traitée par l'article 17, l'évaluation de la conformité correspondra à l'article 43, et la norme technique sur le cadre de confiance pour l'IA répondra aux articles 10 à 15. Celles-ci s'appuieront sur un ensemble de normes plus spécifiques dédiées à des points techniques particuliers : bonnes pratiques de préparation de données, métriques d'évaluation de performance, identification des biais, mécanismes de défense contre les vulnérabilités spécifiques de l'IA, etc. L'objectif

2. Plus d'informations sur <https://www.cenelec.eu/areas-of-work/cen-cenelec-topics/artificial-intelligence/> (site consulté le 25 juillet 2024).
3. Le texte complet du mandat est librement accessible sur [https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/enorm/mandate/593\\_en](https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/enorm/mandate/593_en) (site consulté le 25 juillet 2024).

est d'apporter des réponses et un accompagnement à chacun des participants au développement et à la mise sur le marché d'un système d'IA.

Ce travail, le CEN-CENELEC ne le réalisera pas seul, mais en interface directe avec l'ISO/IEC (notamment le sous-comité 42<sup>4</sup>, équivalent mondial du JTC 21), en s'appuyant sur l'accord dit de Vienne, qui vise à limiter les divergences régionales avec les normes techniques internationales. De manière générale, ces comités visent à valoriser et à entériner les bonnes pratiques déjà existantes dans la communauté IA plutôt que d'en recréer arbitrairement de nouvelles. Dans l'idéal, toutes ces règles seraient déjà appliquées de longue date par les développeurs de systèmes!

### Un défi technique mais aussi humain

Développer des normes harmonisées en appui à l'AI Act, c'est un travail aussi inédit qu'ambitieux. Les délais sont fortement contraints : par le calendrier législatif bien sûr, mais avant tout par l'urgence sociétale à clarifier les exigences applicables à ces systèmes. Comment stabiliser des règles faisant largement consensus, entre organisations, entre communautés et entre pays, dans un contexte où la sortie de ChatGPT à mi-chemin du processus a à la fois chamboulé les repères et renforcé les attentes réglementaires ? Voilà l'équation que les experts du JTC 21 ont jusqu'à fin 2025 pour résoudre.

Une équation à plusieurs composantes : par rapport à d'autres réglementations européennes ayant eu recours à ce mécanisme de normes harmonisées, l'AI Act détonne par la diversité des compétences que son

implémentation sollicite. En filigrane de points hautement techniques (comme les méthodes pour l'interopérabilité des réseaux de neurones), nombre de débats prennent aussi un ton juridique (conséquence de la place centrale qu'occupe le respect des droits fondamentaux dans l'AI Act : vie privée, égalité, conditions de travail...), tout en s'entrelaçant avec de multiples réglementations sectorielles (par exemple sur les dispositifs médicaux). Chacun a son rôle à jouer dans ce tableau, et les présidents de groupes et de comités ont la lourde tâche d'aider ces divers mondes à se parler et à se comprendre et, à terme à s'accorder.

### Quel rôle pour la recherche ?

Les chercheuses et chercheurs en IA sont des parties prenantes de premier plan pour l'élaboration de ces normes, d'une part du fait de l'expertise de pointe qu'ils peuvent apporter pour avancer les réflexions, et d'autre part car ces spécifications les concernent en réalité autant que l'industrie en tant qu'inventeurs des nouvelles méthodes permettant aux fournisseurs de mieux y répondre, mais aussi en tant que fournisseurs eux-mêmes (de données, de bibliothèques, de modèles), dans un domaine où la boucle de la recherche au déploiement ne fait que se raccourcir.

Toutefois, en pratique, la recherche est très peu représentée dans ces comités. Ce n'est pas spécifique à l'IA : la Commission européenne a publié en mars 2023 un ensemble de recommandations<sup>5</sup> visant à améliorer la participation de la recherche dans la normalisation européenne. Dès 2022, diverses réflexions internes au sein de l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (INRIA) visaient à élucider ce paradoxe : partage d'expériences, études de cas, consultation de chercheurs, ateliers scientifiques... tout porte à penser que l'intérêt de fond est là, car les thématiques abordées en normalisation sont souvent très proches des bonnes pratiques mises au point par la communauté scientifique elle-même, comme c'est le cas en IA. Les principaux freins semblent plutôt liés à la faible visibilité de ces activités, à leur fonctionnement souvent méconnu et à une compréhension encore trop partielle de l'impact majeur que peuvent avoir ces normes sur de nombreux aspects de la société, jusqu'à la préservation des droits fondamentaux européens. Alors, vu tous les regards tournés aujourd'hui vers l'AI Act, l'IA pourrait-elle être le domaine qui relance ce dialogue entre recherche et normalisation ? ■

« Chacun a son rôle à jouer dans ce tableau, et les présidents de groupes et de comités ont la lourde tâche d'aider ces divers mondes à se parler et à se comprendre et, à terme, à s'accorder. »

4. Voir : <https://www.iso.org/committee/6794475.html> pour une description détaillée des activités du sous-comité (site consulté le 25 juillet 2024).

5. « Code de bonnes pratiques en matière de normalisation dans l'espace européen de la recherche », recommandation (UE) 2023/498 de la Commission du 1<sup>er</sup> mars 2023 : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32023H0498> (site consulté le 25 juillet 2024).

# L'intelligence artificielle et nous

Comment ouvrir le débat sur les enjeux de l'intelligence artificielle dans nos vies quotidiennes avec le grand public? Le Quai des Savoirs et Universcience se sont associés pour coproduire une grande exposition art-science-société qui questionne de façon ludique, interactive et parfois décalée les conséquences positives comme négatives du développement de cette technologie.

L'intelligence artificielle s'inscrit dans la longue liste des innovations scientifiques et technologiques qui nous promettent un avenir plus sûr, plus facile, voire plus harmonieux. Depuis les véhicules autonomes jusqu'aux systèmes de traduction automatique qui permettent aux humains de communiquer directement entre eux-mêmes s'ils parlent chacun une langue différente, en passant par les robots physiques et surtout virtuels (*chatbots*) pour nous assister, nous inspirer, nous renseigner – voire nous enseigner –, aucun domaine d'activité ne semble lui échapper.

En échange, il nous faudrait accepter de ne plus jamais gagner aux échecs, ni au jeu de go, face aux machines. Mais aussi d'être répertoriés, catalogués, scrutés à chaque moment de nos vies, du berceau à la tombe, transformés en données du *Big Data* pour être plus prévisibles, voire mieux gouvernés? Dans un monde où l'intelligence artificielle s'immisce dans nos quotidiens, que perdons-nous? Que gagnons-nous?

L'exposition « IA : Double Je », coproduite par le Quai des Savoirs et Universcience, est conçue comme une boîte à outils de ressources et de pistes de réflexion, accessibles au plus grand nombre, offrant des repères tant dans le domaine des sciences du numérique, de l'ingénierie et de la technologie que de l'histoire, des sciences sociales et de l'imaginaire, tout en visant, dans le même temps, à stimuler l'esprit critique de ses visiteurs, à un moment où l'effet de halo<sup>1</sup> autour des technologies d'intelligence artificielle n'a jamais été aussi puissant. En 2024, Universcience a orienté son baromètre de l'esprit critique sur les rapports qu'entretiennent nos concitoyens avec l'IA.

Pour ce faire, cinq choix éditoriaux, scientifiques et culturels ont été réalisés par l'équipe de conception muséographique, accompagnée par un comité scientifique constitué d'experts des sciences du numérique et des mathématiques, mais aussi d'un philosophe, d'une juriste, d'un sociologue et d'un psychologue.

## L'intelligence artificielle et nous : une technologie bien concrète

Premier choix réalisé, celui d'aborder l'IA par ses applications. Le parcours de l'exposition invite

les visiteurs à appréhender la définition de l'IA et de ses principales notions (IA symbolique *versus* IA générative, apprentissage machine, explicabilité, etc.) à travers quatre grands domaines applicatifs : la mobilité, la santé, le travail et l'environnement.

Dès son entrée dans l'exposition, le visiteur est invité à embarquer dans un véhicule autonome, véritable démonstrateur de la diversité des fonctions assurées par l'IA. Dans ce premier module, il peut à la fois explorer concrètement les pistes de recherche appliquée pour faire fonctionner des véhicules autonomes en toute sécurité et aborder les questions éthiques et de responsabilité soulevées par ce type de machines<sup>2</sup>.

C'est le second choix éditorial que nous avons réalisé : aborder les questionnements éthiques liés aux multiples développements de l'IA dans nos sociétés, en même temps que les éléments d'information et de vulgarisation scientifique. Ceci afin de montrer que

LAURENT CHICOINEAU

Directeur du Quai des Savoirs

1. Gilbert Simondon, *Sur la technique*, PUF, 2014.

2. Lesquelles, rappelons-le, ne sont toujours pas autorisées à circuler en Europe.



© Patrice Nin

Module d'exposition sur le véhicule autonome.

l'éthique n'est pas une question « à part », qui ne se poserait qu'en fin de parcours, dans une espèce de supplément d'âme de la visite. D'un point de vue muséographique, les concepteurs ont fait le choix d'intégrer des installations artistiques qui, souvent, portent des questionnements de nature philosophique ou politique. Par exemple, dans le premier module consacré au véhicule autonome, l'installation *Google Maps Hack* de l'artiste allemand Simon Weckert a été choisie. Cette œuvre, issue d'une performance réalisée par l'artiste dans une rue de Berlin, montre comment un algorithme peut être trompé, et donc comment il peut, à son tour, nous tromper.

Troisième axe éditorial, la déconstruction du dualisme bien/mal, nouveau/ancien, homme/machine. Cette ambition se traduit non seulement dans les propos, mais aussi directement dans la scénographie de Clémence Farrell, qu'elle a imaginée comme un « scéno-graphisme ». Toute l'exposition se déploie en effet dans un univers abstrait dont les murs et le sol sont constitués de divers damiers noir et blanc, au milieu desquels les uniques touches de couleur sont réservées aux contenus, images, films et dispositifs interactifs.

Ce fil rouge de la dualité plonge bien évidemment au cœur de la machinerie informatique, dans le langage machine des zéros et des uns. Il nous entraîne aussi vers des réflexions existentielles très actuelles,

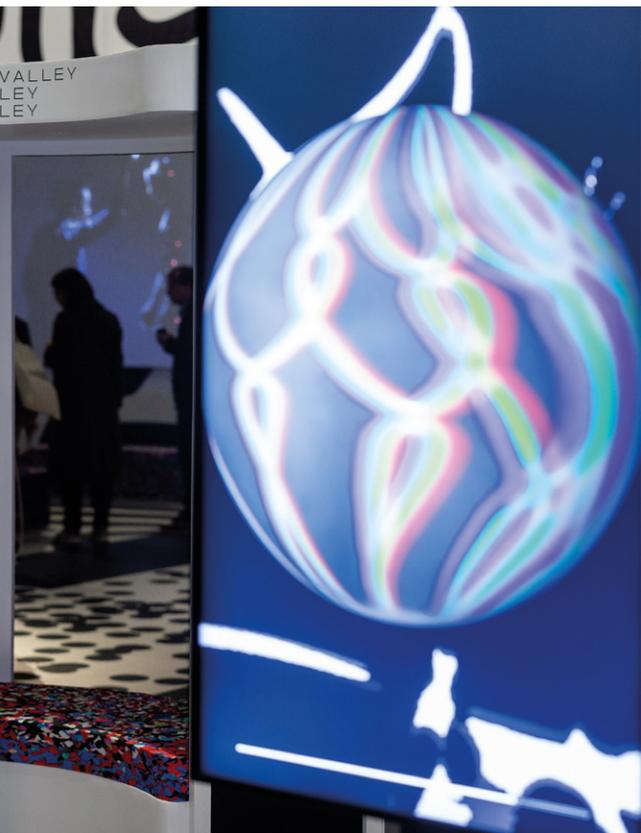


Module d'exposition sur les imaginaires de l'IA, de la science-fiction à la Silicon Valley.

Entrée de l'exposition « IA: Double Je » au Quai des Savoirs.



© Laurent Milon



frise chronologique, démarrant au XIV<sup>e</sup> siècle, raconte l'histoire longue de ce désir humain de création à son image. Ces éléments perturbent, à leur tour, la vision simpliste d'une technologie strictement rationnelle et totalement nouvelle.

Enfin, cinquième et dernier objectif : faire vivre une expérience de visite mémorable et collective aux visiteurs afin de stimuler leur esprit critique et d'alimenter leurs conversations et réflexions post-visite. L'ensemble de l'exposition s'inscrit bien évidemment dans cette dynamique, mais deux dispositifs particuliers sont mis en place pour nourrir les débats : des interviews croisées d'experts et le « Projet 42 », autour de l'acceptabilité des techniques. Cinq expertes et experts ont été interviewés avec les trois mêmes questions : « Qui contrôle l'IA ? », « Une machine peut-elle créer ? » et « Une machine peut-elle penser ? »<sup>4</sup>. Les réponses apportées par les unes et les autres divergent parfois et interrogent les visiteurs. À nouveau, l'exposition ouvre à la complexité plutôt qu'à la simplification. Le Projet 42, quant à lui, offre aux visiteurs la possibilité d'éprouver leur propre acceptabilité des technologies à travers une série de questions liées à des activités de la vie quotidienne. Conçu et réalisé par Airbus avec des sociologues, il s'agit d'évaluer, aux regards des objectifs du développement durable définis par l'UNESCO, les fonctions et la place que nous sommes prêts à laisser aux machines dites intelligentes dans un futur désirable.

celles qui dénoncent – ou qui espèrent – un prochain remplacement de l'humain par les machines. Tout l'enjeu de l'exposition consiste à déconstruire cette idée, fondée sur un rapport de compétition qui renvoie l'IA à un simple programme de jeu d'échecs ou de go. Il s'agit de montrer la complexité et la diversité des interactions humain-machine plutôt que de les simplifier. Les biais algorithmiques fournissent un bon exemple de cette complexité, dans la mesure où ils sont issus de nos propres biais culturels et sociaux. Bien souvent, la machine ne fait que répéter et nous renvoyer notre propre image, sans intention propre ni volonté cachée – d'où le titre « Double Je ».

### L'IA, entre imaginaire, représentations et attentes citoyennes

Quatrième axe éditorial, le rôle de l'imaginaire et des fictions dans l'histoire et le développement de ce domaine scientifique et technique. Souligné par Cédric Villani dans son rapport sur l'IA au gouvernement<sup>3</sup>, ce rôle traduit la nature profonde de la technique rêvée comme une extension par l'humain de lui-même, de ses fonctions physiques et cognitives. L'exposition invite les visiteurs à plonger aux racines fictionnelles de l'intelligence artificielle, depuis la mythologie grecque jusqu'aux récits de science-fiction contemporains. Une

Six mois après son ouverture à Toulouse au Quai des Savoirs, l'exposition « IA : Double Je » a accueilli plus de 40 000 visiteurs. Une étude des publics est en cours afin d'évaluer comment les cinq objectifs éditoriaux rapidement présentés ici auront été réalisés. Précisons qu'en résonance avec les visites de l'exposition, sont organisées tout au long de l'année 2024 des activités pour les jeunes et les scolaires, et un riche programme culturel de rencontres publiques, de projection de films, de résidences de création, de production de podcasts et d'événements culturels participatifs. L'intelligence artificielle est un sujet trop sérieux pour le laisser aux seuls décideurs. ■

3. Cédric Villani, *Donner un sens à l'intelligence artificielle. Pour une stratégie nationale et européenne*, rapport au gouvernement français, 2018.

4. Alan Turing, « Computing machinery and Intelligence », *Mind*, vol. 59, n° 236, octobre 1950, p. 433-460.

« L'intelligence artificielle est un sujet trop sérieux pour le laisser aux seuls décideurs. »

# Explorer la culture par le truchement de l'intelligence artificielle

Le potentiel de l'Intelligence artificielle (IA) fascine et inquiète les entreprises culturelles et créatives tout comme les ayants droit. L'IA est depuis plusieurs années déjà intégrée dans les services qui sont proposés par les grandes plateformes de création et de partage de contenus et leurs algorithmes de recommandation. L'IA générative et multimodale vient à son tour s'immiscer, sous couvert d'interfaces conversationnelles, dans la relation entre les publics et les contenus culturels.

**JEAN-GABRIEL MINEL**

Chargé de mission, Direction générale des médias et des industries culturelles, ministère de la Culture

## La découverte culturelle à l'ère numérique

La découverte en ligne d'une offre culturelle, qu'elle soit physique ou numérique, repose sur des mécanismes communs à tous les secteurs. Une part infime des clients qui franchissent la porte d'un commerçant est passée par son site Internet. Google Maps, Apple Plans, Facebook, Instagram et Tik Tok constituent autant de portes d'entrée potentielles. Ces plateformes, aussi appelées *GateKeepers* (« Gardiens de la porte »), ont beaucoup investi pour ériger ces outils de mise en relation entre les internautes et les marchands.

Le commerçant et le créateur doivent maîtriser ces outils pour être visibles sur ces carrefours d'audience. Cependant, la rencontre entre leurs contenus et le public est régie par des algorithmes complexes et opaques que certains acteurs<sup>1</sup> tentent de décrypter. Produire un contenu et des métadonnées de qualité ne suffit plus à se démarquer dans la jungle d'Internet. Les algorithmes n'ont jamais été capables de juger la qualité d'un contenu. Ils ont été programmés pour prendre des décisions en fonction de représentations qui caractérisent les contenus, les utilisateurs et leurs interactions.

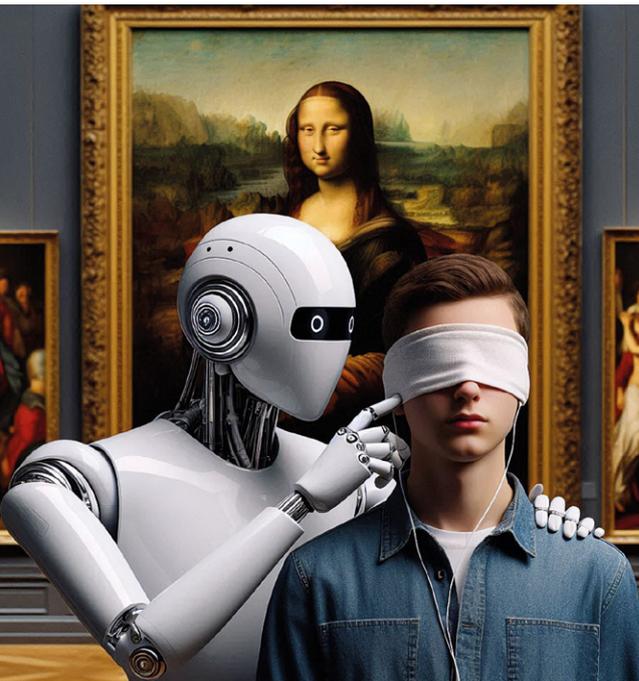
## L'économie de l'attention et les défis des algorithmes

Ainsi, la portée d'une offre culturelle repose davantage sur des paramètres exogènes tels que l'engagement des internautes (*likes*, partages, commentaires), les évaluations laissées par les visiteurs, la notoriété des sites mentionnant l'établissement ou encore la performance d'offres ou de publicités concurrentes. Nous sommes entrés de plain-pied dans une économie de l'attention, où les algorithmes des plateformes sont programmés, à quelques rares exceptions<sup>2</sup> près, pour fidéliser et augmenter le temps d'écran.

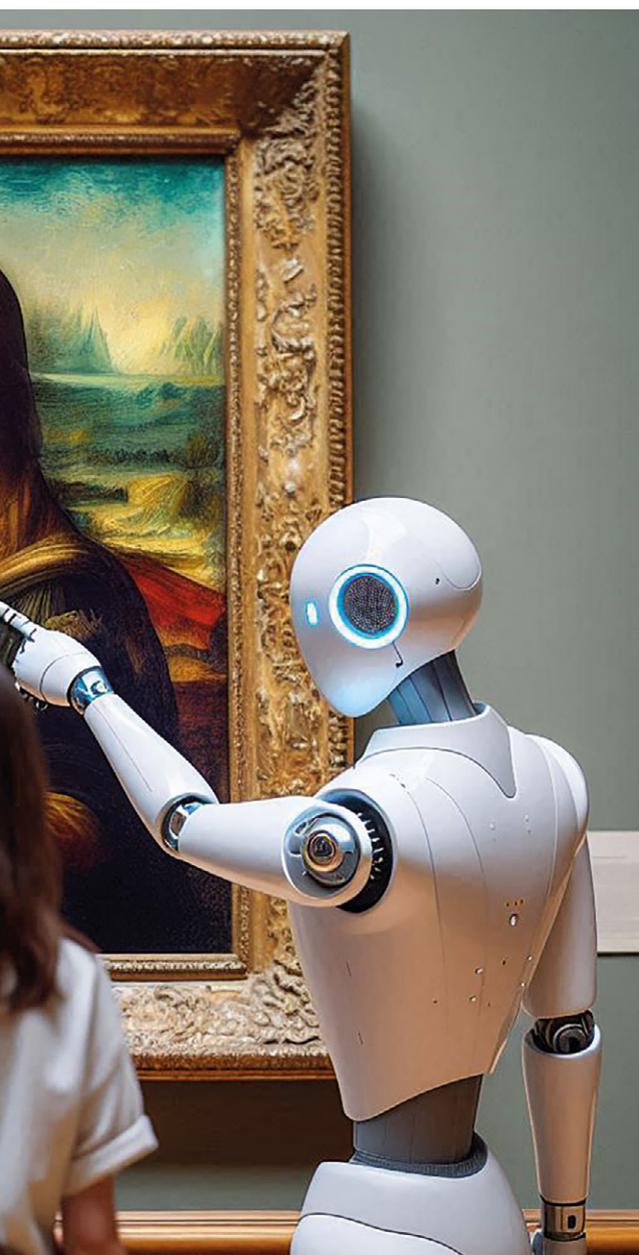
1. Music Tomorrow ([www.music-tomorrow.com](http://www.music-tomorrow.com)) et le Pôle d'expertise de la régulation numérique ([www.peren.gouv.fr](http://www.peren.gouv.fr)) (site consulté le 25 juillet 2024).

2. Radio France a développé un algorithme de recommandation de service public pour concilier performance et découvrabilité.





L'assistant et l'assisté, image générée par une IA, juillet 2024.



Les nouvelles capacités des IA multimodales et génératives permettent des recommandations plus nuancées et des expériences plus personnalisées. Mais ces innovations développées par des géants comme Google ou Meta<sup>3</sup> restent encore confidentielles car elles sont expérimentées hors du marché européen, lequel dispose d'une réglementation plus contraignante afin de protéger les utilisateurs.

### L'avenir des interfaces utilisateurs

Google<sup>4</sup>, par exemple, déploie progressivement la *Search generative expérience* (SGE). L'utilisateur n'a plus à consulter les différents résultats retournés par le moteur de recherche. Il peut poser des questions en langage naturel plus complexes, auxquelles l'IA répond par des aperçus (*AI overviews*) qui rassemblent et synthétisent les informations utiles. Ces innovations préfigurent la mutation de nos interfaces en véritables assistants virtuels. Leur facilité d'usage devrait rapidement disqualifier nos anciennes IHM (interfaces homme-machine) et transformer durablement notre rapport à l'information, à la connaissance et à la culture.

### Questions éthiques et impacts sur la création

Cependant, comme tous les systèmes basés sur des grands modèles de langage (LLM), ces assistants soulèvent des questions éthiques, en plus des questions de propriété intellectuelle. Ils peuvent parfois représenter incorrectement les faits ou produire des résultats biaisés, avec des représentations limitées des personnes ou des associations contextuelles négatives. Ils peuvent également affecter le trafic vers les sites Internet des éditeurs ou des créateurs, moyen essentiel de valoriser leur travail. Enfin, en permettant à l'utilisateur de personnaliser le format et/ou la durée (écouter un article de presse, lire le résumé d'une vidéo...), ces assistants pourraient porter atteinte au respect de l'intégrité des œuvres et réduire à néant l'expérience que l'auteur ou l'artiste a voulu transmettre.

L'IA générative ouvre de nombreuses perspectives d'innovation et de démocratisation de la création. Mais elle a également des effets structurels, en introduisant des évolutions des chaînes de valeurs et des métiers, sur les industries culturelles et créatives, filière majeure pour notre pays, tant du point de vue de sa contribution en valeur et en emplois que de son effet d'entraînement sur l'ensemble de la société.

En s'immisçant entre les publics et les contenus, ces assistants transforment en profondeur notre rapport à la culture et à l'information. Dès lors, il conviendra de savoir si nous pouvons leur faire confiance pour les tâches que nous sommes prêts à leur déléguer. Ne dit-on pas que la confiance ne se décrète pas ? Elle se gagnera au prix de la transparence. ■

L'esprit critique, image générée par une IA, juillet 2024.

3. Meta a annoncé en juillet 2024 qu'il ne publierait pas les versions multimodales de ses produits et modèles d'IA dans l'UE en raison d'un environnement réglementaire imprévisible.

4. Dès 2017, Google avait affirmé son positionnement d'*AI-first company* (d'entreprise d'IA).

# Les technologies des langues :

## un secteur stratégique pour des IA souveraines, compétitives et respectueuses de nos langues en France et en Europe

La langue occupe une place centrale dans l'intelligence artificielle : d'un côté, la machine se nourrit de données en langage naturel, et doit donc pouvoir analyser et absorber d'importantes quantités de ressources écrites ou orales, par le biais de la reconnaissance vocale par exemple ; de l'autre, ce que la machine calcule et produit, elle doit pouvoir le restituer à l'humain, sous forme compréhensible, que ce soit sous forme écrite, comme par exemple des annonces d'événements culturels rédigées automatiquement (robot-rédaction) ou sous forme orale, à l'aide de technologies de synthèse vocale, et ce, dans le plus grand nombre de langues possibles, impliquant le recours à des modèles linguistiques avancés pour chaque langue utilisée.

### THIBAUT GROUAS

Chef de la mission Langues et numérique, délégation générale à la langue française et aux langues de France, ministère de la Culture

### Une histoire récente

L'intelligence artificielle générative, avec la popularisation de ChatGPT, est désormais au cœur des enjeux d'innovation et de valorisation, et fait l'objet, pour cette raison, d'un intérêt croissant de la part des pouvoirs publics. Au-delà des réflexions stratégiques, c'est l'emploi même de la langue qui est questionné par cette technologie. En effet, la précision et le fonctionnement d'un modèle d'intelligence artificielle conditionnent le rapport que les gens entretiennent avec leur langue. Il s'agit donc d'utiliser cette technologie de façon réfléchie pour préserver et promouvoir la diversité linguistique, tout en tirant parti de ses fonctionnalités (traduction automatique, outil de correction grammaticale et de rédaction, agents conversationnels, synthèse et reconnaissance de la voix, etc.).

Le développement et l'amélioration constante de ces technologies permettent de découpler les interactions possibles avec des systèmes à base d'intelligence artificielle, au point qu'elles sont aujourd'hui omniprésentes dans notre quotidien.

La priorité donnée par le gouvernement français à la recherche et à l'innovation dans l'Intelligence artificielle (IA) a été rappelée par le président de la République lors du salon VivaTech de juin 2023, qui

a indiqué vouloir installer auprès de la Cité internationale de la langue française « un laboratoire des technologies linguistiques » qui viendrait compléter l'offre de la Cité.

Le ministère de la Culture inscrit sa contribution dans cette ambition, en mobilisant l'ensemble des expertises autour de deux projets complémentaires destinés à susciter un écosystème très puissant autour de l'IA et des technologies de la langue, domaine technologique en forte croissance économique consacré au développement de systèmes artificiels capables de traiter le langage humain. Ces deux projets seront présentés au public à l'occasion du dix-neuvième sommet de la Francophonie le 4 octobre 2024.

### Créer à Villers-Cotterêts un organisme européen ALT-EDIC pour les technologies des langues et l'IA

La Commission européenne a mis en place en 2023 un nouveau type de structure destiné à renforcer la compétitivité et la souveraineté industrielle, les *European digital infrastructure consortium* (EDIC). La France, au travers du ministère de la Culture



© Thibault Grouas

Cité internationale de la langue française.



Logo de l'Alliance pour les technologies des langues.

(Délégation générale à la langue française et aux langues de France – DGLFLF –, Service du numérique – SNUM) et de Bercy, a proposé de mettre en place un EDIC dédié aux questions de technologies des langues et d'IA, l'Alliance pour les technologies des langues (ALT-EDIC).

À l'occasion du dernier salon de VivaTech en 2024, le président de la République a réitéré son soutien à cette initiative qui permettra l'émergence et le partage de modèles de langue géants, ouverts et en accès libre, mais également d'encourager le marché de ces technologies pour l'ensemble des langues européennes, en particulier les langues européennes moins dotées.

L'ALT-EDIC, coordonnée par la France et en partenariat avec 24 États membres de l'UE, vient de recruter son directeur, qui prendra ses fonctions dès l'automne. Ses locaux se trouveront dans le site de la Cité internationale de la langue française à Villers-Cotterêts, et elle pourra s'appuyer sur les contributions financières des États membres partenaires ainsi que sur les fonds obtenus en répondant à des appels de la Commission européenne. Les premiers projets européens impliquant l'ALT-EDIC devraient ainsi démarrer dès le printemps 2025.

De nombreux acteurs français et européens se sont d'ores et déjà engagés aux côtés de l'ALT-EDIC dans des propositions pour la Commission européenne, comme par exemple, en France, dans le domaine industriel, Orange ou EDF, des entreprises de taille plus modeste qui développent des technologies innovantes telles que LightOn ou encore Nijta, ou encore des acteurs scientifiques tels que le CNRS et INRIA.

### **Développer un nœud national LANGU:IA dédié à la langue française autour d'ALT-EDIC**

ALT-EDIC doit être complétée par un nœud national confirmant l'engagement de l'État pour sa souveraineté et sa détermination à associer les partenaires nationaux et francophones; il vise à développer un écosystème d'innovation pour le français et les langues de France à travers notamment l'accompagnement ou l'incubation des acteurs industriels et académiques. Il vise aussi à promouvoir des artistes et des chercheurs qui explorent ces technologies, tels que l'association Les Causeuses, qui interroge sur nos relations à la technologie.

Le projet LANGU:IA, lauréat en octobre de l'appel France 2030 « Pôles territoriaux des industries culturelles et créatives », développe ainsi trois études sur les aspects économiques et juridiques, et sur son implantation à Villers-Cotterêts; les résultats de ces études attendues pour l'automne 2024 permettront de préparer une installation dans les meilleures conditions, pour une montée en puissance en 2025-2026.

1. <https://alt-edic.eu> (site consulté le 22 juillet 2024).

Parallèlement à cette phase d'ingénierie, le ministère de la Culture, en lien avec la Direction interministérielle du numérique, a mis en place un dispositif complémentaire Start-up d'État de préfiguration à LANGU:IA, associant notamment des acteurs du secteur culturel et les acteurs économiques, pour proposer une arène IA permettant de comparer les performances des différents modèles de langue et de partager ses préférences.

Avec l'ambition d'installer auprès de la Cité internationale de la langue française de Villers-Cotterêts un centre de référence national et européen sur les questions de traitement des langues, la France cherche à s'assurer que ses langues nationales figurent en bonne place en matière d'outillage mais aussi en matière de

ressources linguistiques disponibles. En effet, l'enjeu de l'intelligence artificielle est un enjeu de souveraineté pour la France, mais aussi pour l'Europe, dans la mesure où le développement de ces outils dépend en très grande partie des ressources linguistiques disponibles et des modèles de qualité dans notre langue.

L'objectif est de renforcer le lien entre les populations et leur langue, de s'approprier ses caractéristiques pour mieux la comprendre et l'accompagner, et ainsi d'utiliser cette opportunité technologique à bon escient pour valoriser son développement. Cette stimulation de l'innovation sera à même de faire émerger de nouveaux acteurs industriels français et européens fortement pourvoyeurs d'emploi, ce qui permettra à terme au territoire d'être compétitif à l'échelle internationale sur le sujet. ■

## « L'enjeu de l'intelligence artificielle est un enjeu de souveraineté pour la France. »

Possibles futurs bureaux de l'ALT-EDIC au sein de la Cité.



© Thibault Grouas

# ANALYSE DE TEXTE ET TRAITEMENT AUTOMATIQUE DU LANGAGE.

## RETOUR SUR UN PROJET DE FOUILLE AUTOMATISÉE DE DONNÉES DANS LES BILANS D'ACTIVITÉ DES SERVICES PUBLICS D'ARCHIVES

En application du Code du patrimoine<sup>1</sup>, le Service interministériel des Archives de France (SIAF) lance, chaque année, une enquête quantitative et qualitative sur l'activité des services publics d'archives<sup>2</sup>.

Afin de permettre un repérage plus rapide des informations susceptibles d'éclairer et de construire la politique publique des archives, le SIAF conduit, en partenariat avec le Service du numérique (SNUM)<sup>3</sup> du ministère de la Culture, un projet de fouille automatisée de données sur les bilans qualitatifs de l'enquête de 2023.

Compte tenu du volume considérable d'information à analyser, le recours à un grand modèle de langage (LLM) s'est rapidement imposé.

Les concepts métier spécifiques des archives ont été progressivement intégrés, avec une double entrée, lexicale et sémantique, pour permettre de bénéficier d'une extraction automatisée des informations qualitatives reçues préalablement au format texte, qui sont désormais rassemblées en un seul fichier de données structuré au format tableur ou HTML. Dans le même temps, l'algorithme de fouille de textes et de traitement automatique du langage a été progressivement entraîné à comprendre les termes propres aux archives. Ces termes sont désormais mis en avant, par surbrillance, dans les fichiers ainsi générés.

Ainsi, il est dorénavant possible, par exemple, d'explorer conjointement

l'ensemble de chacune des rubriques dédiées aux actions de valorisation dans les rapports reçus des 99 services d'archives départementales, sans avoir à les ouvrir un à un comme auparavant, et de repérer immédiatement les informations pertinentes grâce à la mise en avant de termes dédiés.

Une première exploitation des bilans de l'année 2023 est en cours grâce à ce nouvel outil, et la prochaine étape consistera à soumettre l'ensemble de chaque rubrique des bilans à une instance d'intelligence artificielle générative afin de détecter rapidement les grandes tendances observables au niveau national qui pourront être confirmées – ou infirmées – par des recoupements manuels ciblés. ■

### BASTIEN CHASTAGNER

Chef du bureau de l'accès aux archives et de l'animation du réseau, sous-direction du pilotage, de la communication et de la valorisation des archives, Service interministériel des Archives de France (SIAF), ministère de la Culture

1. Article R.212-56 du Code du patrimoine : « Les collectivités territoriales remettent chaque année au préfet un rapport relatif à la situation, à l'activité et au fonctionnement de leur service d'archives, accompagné des éléments statistiques nécessaires à l'élaboration du rapport annuel sur les archives publiques en France, ainsi qu'un programme de travail pour l'année à venir. »
2. Ce réseau correspond au maillage territorial français et rassemble 3 services à compétence nationale, 99 services d'archives départementales, 17 services d'archives régionales, près de 600 services d'archives communales et intercommunales, ainsi qu'une centaine de services d'archives dans des établissements publics nationaux et locaux. Près de 600 services répondent chaque année à cette enquête.
3. Sous-direction des infrastructures et des services aux agents.

« Une première exploitation  
des bilans de l'année 2023  
est en cours grâce  
à ce nouvel outil. »

Exemple de bilan de l'année 2023 avec les termes mis en avant par surbrillance

AD012_bilan_2023	<p>[l'exposition "voyage en aveyron, le cadastre au fil du temps" a été cloturée fin juin 2023, après un an d'ouverture, elle a permis l'organisation de nombreuses propositions culturelles nouvelles pour les archives départementales, telles qu'un cycle de conférence, d'ateliers enfants et adultes, ainsi que des propositions plus décalées, l'ensemble de ces propositions ayant été bien accueillies du public, le choix a été fait de les poursuivre en dehors des temps de présentation des expositions, au rythme d'une conférence par mois, de deux ateliers enfant par période de vacances <b>SCOLAIRES</b>, et d'ateliers adultes tous les deux mois, au total, 74 activités culturelles ont été proposées en 2023, en incluant outre les éléments déjà mentionnés les ateliers du service éducatif, pour 1793 <b>VISITEURS</b> accueillis (1113 enfants, 680 adultes), il faut préciser à ce titre que les <b>VISITEURS</b> libres de l'exposition n'ont pas été comptabilisés, les archives départementales ont également proposé, à l'été 2023, une exposition relative à Jean Moulin, préfet de l'Aveyron en 1937 et 1938, enfin, au mois de décembre, elles ont accueilli une exposition autour de Jean-Henri Fabre, entomologiste originaire de l'Aveyron, enfin, plusieurs partenariats ont donné lieu à des propositions culturelles spécifiques hors les murs, avec notamment la constitution de dossiers pour le <b>CONCOURS</b> national de la résistance et de la déportation et au <b>CONCOURS</b> des petits artistes de la mémoire, ainsi qu'au village des sciences, ]</p>
------------------	--

# L'IA et l'écologie. Les micro-réseaux électriques « intelligents »

Les micro-réseaux électriques intelligents ou *smart grids* sont considérés comme des leviers de la transition énergétique grâce à l'intégration de sources énergétiques renouvelables dont l'intermittence est palliée à l'aide de technologies de stockage pilotées avec des algorithmes « intelligents ».

## RIMA OULHAJ

Doctorante en génie énergétique,  
Laboratoires d'ingénierie des systèmes  
physiques et numériques (LISPEN),  
École nationale supérieure d'arts  
et métiers (ENSAM)

1. Jiwen Rao, Yong He et Jianping Liu,  
« Standalone versus grid-connected?  
Operation mode and its economic  
and environmental assessment  
of railway transport microgrid »,  
*Sustainable Cities and Society*, vol. 98,  
novembre 2023, p. 104811.

## Les sources énergétiques distribuées comme moyen de décarbonation du secteur énergétique

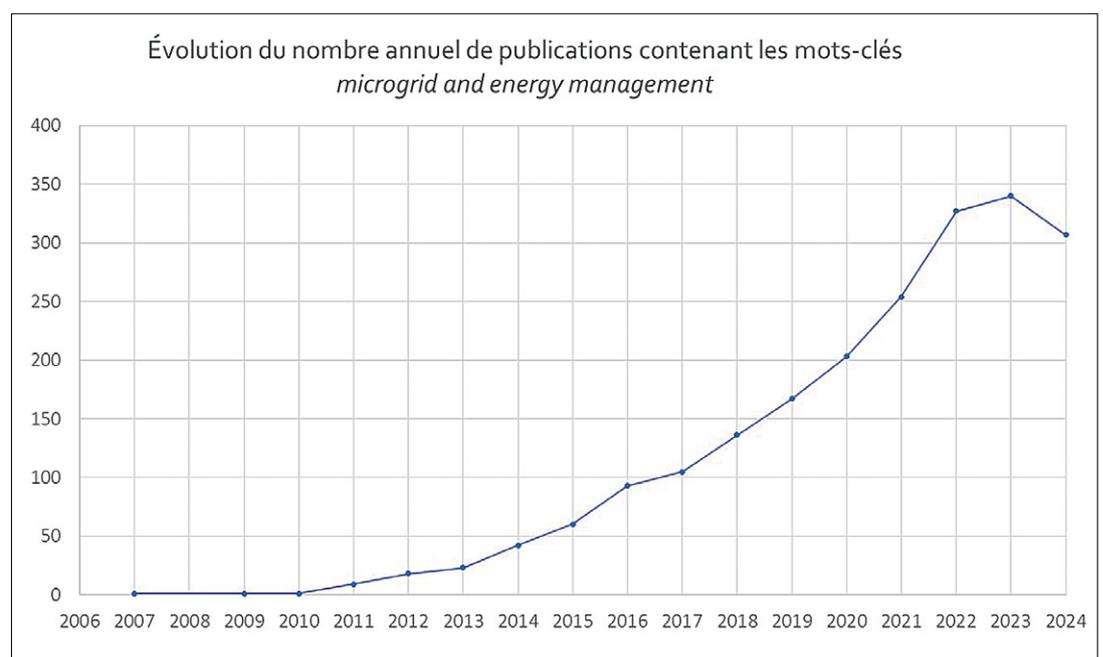
Les sources énergétiques distribuées (SED ou DER pour *Distributed energy resources*) sont étudiées en tant que moyen prometteur pour atteindre les objectifs de réduction de l'impact en gaz à effet de serre du secteur énergétique.

Les DER sont des technologies locales de génération et de stockage d'énergie intégrant principalement des sources renouvelables comme les panneaux photovoltaïques ou les petits parcs éoliens et constituant ainsi un vecteur énergétique quasi totalement électrique.

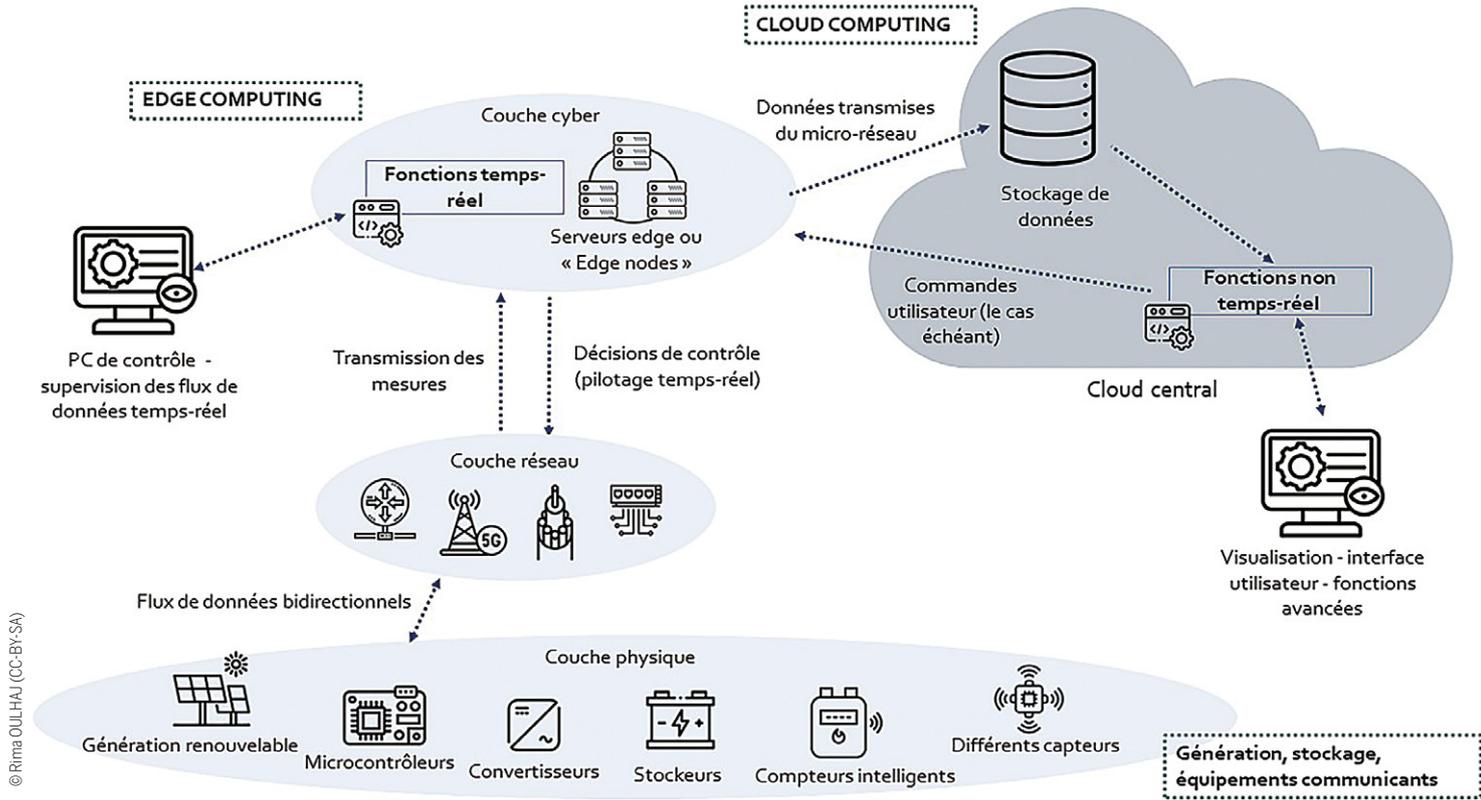
Ces technologies sont agrégées dans ce que l'on appelle un micro-réseau électrique (ou *electric microgrid*) qui peut être défini comme un unique système contrôlable pouvant, selon le scénario en question, se connecter et se déconnecter du réseau de distribution public (modes connecté et insulaire respectivement<sup>1</sup>).

Les micro-réseaux électriques sont, par définition, des systèmes électriques décentralisés, ce qui signifie qu'ils sont opérés indépendamment du réseau de distribution public, garantissant ainsi une certaine autonomie décisionnelle. Leur pilotage, assuré par des systèmes de contrôle de plus en plus sophistiqués

Évolution du nombre annuel de publications contenant les mots-clés  
*microgrid and energy management*



Évolution du nombre annuel  
de publications sur le pilotage  
des micro-réseaux électriques  
selon le moteur de recherche  
Scienedirect.



© Rima OULLHAJ (CC-BY-SA)

Architecture multicouche d'un micro-réseau électrique intelligent avec l'intégration de l'informatique en nuage et en périphérie.

et « intelligents », vise l'optimisation de critères tels que la minimisation de la facture énergétique (due aux déséquilibres entre consommation et production renouvelable locale), la maximisation de la pénétration d'énergies renouvelables ou l'autonomie énergétique, à savoir l'autoconsommation de l'énergie produite localement.

### Les micro-réseaux électriques intelligents : de quelle « intelligence » s'agit-il ?

En 2011, l'Union européenne (UE) a défini un réseau intelligent (ou *smart grid*) comme un réseau électrique mis à niveau auquel ont été ajoutés un système numérique de communication bidirectionnelle entre fournisseur et consommateur, un système intelligent de mesure et un système de contrôle<sup>2</sup>. Les micro-réseaux électriques intelligents sont plus généralement définis comme la concaténation de DER et d'appareils intelligents (c'est-à-dire communicants) pour le pilotage de la demande et de la production. Le pilotage « intelligent » permet d'optimiser les performances de ces *smart grids* en améliorant leur fiabilité et leur résilience<sup>3</sup>.

On constate alors que l'aspect « intelligent » de ces réseaux est, selon les différentes définitions, soit lié aux équipements qu'ils comprennent (compteurs intelligents, équipements communicants, « IoT<sup>4</sup> »...), soit aux processus (algorithmes) de prise de décision pour le pilotage des technologies locales de production et de stockage. Or le seul fait de comprendre des équipements communicants ne garantit pas le pilotage de ces *smart grids* de façon à optimiser les critères cités

ci-avant. En réalité, l'intelligence dans ce contexte correspond davantage à la conception d'un système de pilotage permettant le contrôle des technologies pilotables, notamment les stockeurs qui permettent de pallier l'intermittence des énergies renouvelables, de façon à résoudre un problème de contrôle optimal<sup>5</sup>.

### Le pilotage intelligent des micro-réseaux électriques : algorithmes et acceptabilité

Une conception courante du système de pilotage de micro-réseaux électriques correspond au contrôle dit hiérarchique, comprenant souvent trois couches. Les fonctions de chacune varient légèrement dans la littérature<sup>6</sup> mais on peut convenir que la troisième couche optimise des critères choisis (économique,

2. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions, « Réseaux intelligents : de l'innovation au déploiement », 2011. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0202> (site consulté le 15 juillet 2024).

3. Dharmendra Yadeo, Sachidananda Sen et Vigya Saxena, « Smart grid: Solid-state transformer and load forecasting techniques using artificial intelligence », dans Vedik Basetti et al. (eds), *Artificial Intelligence and Machine Learning in Smart City Planning*, Elsevier, 2023, p. 181-197.

4. L'Internet des objets (IoT, pour *Internet of things*) est un réseau d'objets et de terminaux connectés équipés de capteurs (et d'autres technologies) leur permettant de transmettre et de recevoir des données entre eux et avec d'autres systèmes. Aujourd'hui, l'IoT est utilisé de manière intensive dans l'industrie.

5. Le contrôle optimal est un problème mathématique où un système de contrôle doit générer des actions en temps réel pour contrôler un système donné (ici le micro-réseau électrique) tout en optimisant un critère choisi sur l'horizon de contrôle: voir Andrew G. Barto, Steven J. Bradtke et Satinder P. Singh, « Learning to act using real-time dynamic programming », *Artificial Intelligence*, vol. 72, n° 1-2, 1995, p. 81-138.

6. Abhay Sanatan Satapathy et al., « Emerging technologies, opportunities and challenges for microgrid stability and control », *Energy Reports*, vol. 11, 2024, p. 3562-3580.

environnemental, etc.), tandis que les deux premières assurent des fonctions techniques comme le maintien de la stabilité de la tension et de la fréquence et la détection de défauts. Plus précisément, la troisième couche est concernée par le problème de contrôle optimal des flux de puissance, alors que les deux premières veillent à ce que certaines grandeurs physiques correspondent à des valeurs de référence ou suivent une trajectoire de référence aussi étroitement que possible en présence de perturbations (problèmes de régulation et d'asservissement respectivement).

Ces fonctions n'entrent pas dans l'aspect « intelligent » des *smart grids*, puisqu'elles sont aussi vieilles que le réseau électrique national et permettent, entre autres, de garantir la sécurité des biens et des personnes. Pour ce qui est du contrôle optimal des flux de puissance, plusieurs algorithmes ont été étudiés dans la littérature : commande prédictive par modèle (CPM ou MPC pour *Model predictive control*) dont le principe est étroitement lié à la commande à horizon glissant (*receding horizon control*) ou encore apprentissage par renforcement (AR), en particulier l'AR sans modèle où le système de pilotage apprend en interagissant avec le micro-réseau (dans un environnement simulé!) à l'aide d'un processus d'essai-erreur.

En théorie, c'est-à-dire sur des cas d'étude simulés, ces algorithmes ont atteint de bonnes performances. Reste à savoir si on est assez confiant pour les implémenter dans des conditions réelles. D'ailleurs, l'explicabilité de ces algorithmes pourrait être la clé de leur acceptabilité, l'explicabilité de l'Intelligence artificielle (IA)<sup>7</sup> étant un domaine de recherche à part entière. Il s'agit de savoir expliquer précisément pourquoi un algorithme prend une certaine décision, et non de l'utiliser comme une « boîte noire ».

### Ressources de calculs, protection de données sensibles et émergence de l'*edge computing*

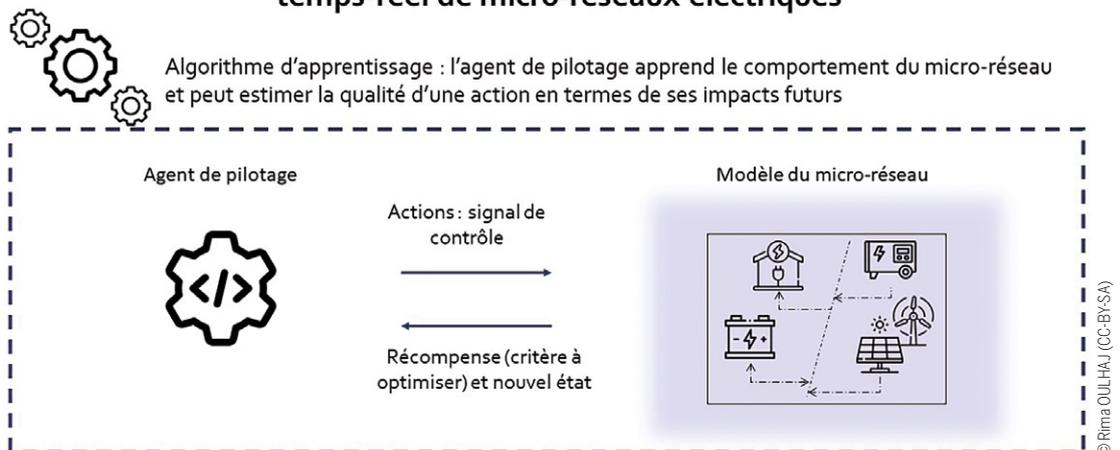
De nos jours, « l'informatique en nuage » ou *cloud computing* arrive sans peine à attirer des utilisateurs souhaitant transférer les responsabilités de maintenance et de sécurisation des infrastructures de calcul à des fournisseurs de services, surtout lorsque les capacités de calculs nécessaires à leur activité excèdent les coûts d'investissement que ces utilisateurs sont prêts à déboursier. Or faire appel à ce genre de service pour effectuer les calculs liés aux algorithmes de pilotage de micro-réseaux électriques cités ci-avant pose deux questions importantes : comment assurer la protection et l'anonymisation des données sensibles de consommation électrique des usagers, et quid du temps de réponse et de la disponibilité des ressources qui doivent être quasi parfaits afin d'éviter les catastrophes.

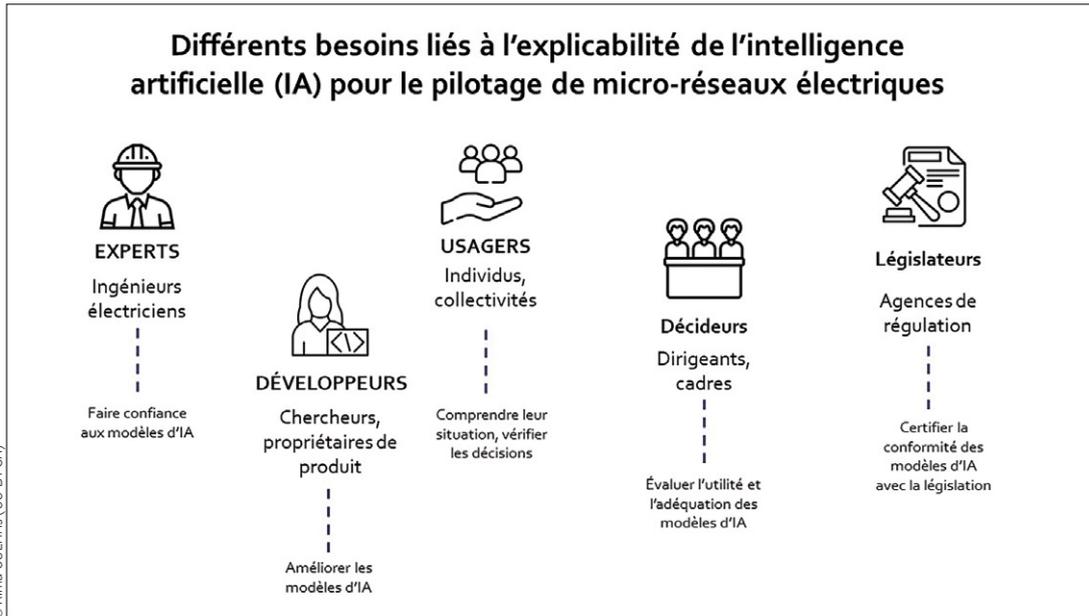
Pour la première question, il n'existe pas de cadre réglementaire spécifique aux *smart grids*, mais il est important de souligner l'importance de la directive européenne NIS 2<sup>8</sup> qui élargit le périmètre de NIS 1 et amène les États membres à renforcer leur coopération en matière de gestion de crises cyber, notamment en donnant un cadre formel au réseau CYCLONE (*Cyber crisis liaison organisation network*) qui rassemble l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI) et ses homologues européens. Le secteur de l'énergie est inclus dans le périmètre des opérateurs régulés (annexe 1 de la directive) et ses acteurs sont donc soumis à ces exigences. D'autres textes sont également applicables dans ce cadre, notamment le règlement européen sur l'IA, approuvé par les États de l'UE le 21 mai 2024 ou encore

7. Yanzhe Bekkemoen, « Explainable reinforcement learning (XRL): A systematic literature review and taxonomy », *Machine Learning*, vol. 113, 2024, p. 355-441.

8. Pour plus de détails, se référer au site de l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI) : <https://cyber.gouv.fr/la-directive-nis-2> (site consulté le 15 juillet 2024).

## Apprentissage par renforcement pour le contrôle temps-réel de micro-réseaux électriques





Différents besoins liés à l'explicabilité de l'IA pour le contrôle en temps réel de micro-réseaux électriques.

la norme française (NF ISO/IEC 23894) donnant des recommandations relatives à la gestion du risque lié à l'IA par les organismes qui développent, produisent, déploient ou utilisent des produits, systèmes et services faisant appel à l'IA.

Pour ce qui est de la disponibilité et du temps de réponse des infrastructures de calcul, « l'informatique en périphérie » ou *edge computing* semble être une solution viable : les calculs sont transférés vers des appareils « *edge* » proches des capteurs afin d'éliminer la latence de communication et d'améliorer la résilience. En effet, si la connexion avec le *cloud* est perdue, les différentes fonctions peuvent s'exécuter en *edge computing* sans perte de service. Le *smart grid* s'apprête naturellement à l'utilisation de l'*edge computing* : la commande de convertisseurs à l'aide de microcontrôleurs est historiquement conforme à l'idée de traiter des données localement pour livrer un service.

L'idée serait d'utiliser des serveurs *edge*, à savoir des capacités à haute disponibilité de calcul proche des capteurs, pour exécuter les différents calculs

nécessaires au pilotage des *smart grids* et aux autres fonctions liées à ceux-ci (par exemple l'estimation en temps réel de l'état de santé et de l'état de charge des stockeurs, la visualisation de l'état du micro-réseau...) et de n'utiliser le *cloud computing* que pour les fonctions non temps-réel (prédiction de consommation future, fonctions avancées de visualisation, etc.).

### Panorama de projets de démonstrateurs de *smart grids*

Le site de la Commission de régulation de l'énergie<sup>9</sup> (CRE) répertorie des projets de démonstrateurs de *smart grids* achevés ou en cours dans le territoire français. Les acteurs les plus importants sont les industriels du secteur énergétique tels que l'Électricité de France (EDF), Énedis ou encore Direct Énergie. Parmi les commanditaires de ces projets de démonstrateurs, on retrouve des territoires tels que la commune Saint-Georges de l'Oyapock, l'île de Marie-Galante et la commune de Pénestin. Des laboratoires de recherche sont également impliqués, dont le laboratoire LAPLACE. ■

9. <https://www.smartgrids-cre.fr/projets> (site consulté le 15 juillet 2024).

« Les acteurs les plus importants sont les industriels du secteur énergétique tels que l'Électricité de France (EDF), Énedis ou encore Direct Énergie. »

# CULTURE ET RECHERCHE

Tous les numéros de *Culture & Recherche* sont disponibles au format pdf sur le site internet du ministère de la Culture.  
[www.culture.gouv.fr/Sites-thematiques/Enseignement-superieur-et-Recherche/La-revue-Culture-et-Recherche/](http://www.culture.gouv.fr/Sites-thematiques/Enseignement-superieur-et-Recherche/La-revue-Culture-et-Recherche/)

Pour s'inscrire sur la liste de diffusion, ou pour tout renseignement :  
[culture-et-recherche@culture.gouv.fr](mailto:culture-et-recherche@culture.gouv.fr)



## Le dernier numéro paru en 2024

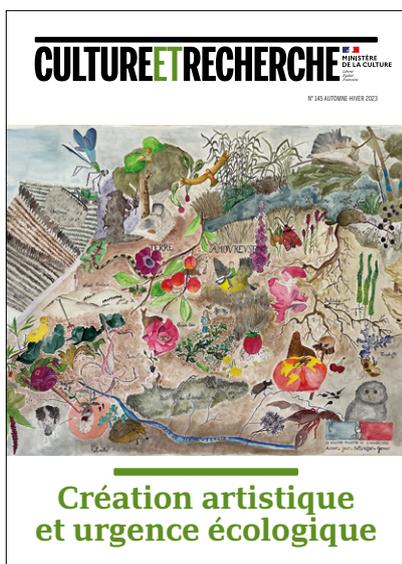
### n° 146 – Printemps-été 2024, Urgence écologique : la recherche à l'épreuve

Après le précédent numéro (n° 145-décembre 2023) de *Culture & Recherche*, dédié à la création artistique face à l'urgence écologique, ce deuxième volet est consacré aux défis environnementaux de la recherche culturelle. Il en présente les différentes productions qui traduisent une attention renouvelée aux écosystèmes pour une cartographie écologique et humaine.

Au cœur du plus grand défi jamais affronté par l'humanité, les communautés scientifiques inscrivent l'écologie non seulement comme objet propre de recherche, mais aussi comme une nouvelle forme d'humanisme, un engagement tourné vers la réitération de l'habitabilité de la Terre. Les chercheurs et chercheuses investissent les domaines pluriels des patrimoines (archéologie, archives, monuments historiques, musées...), de l'architecture, des bibliothèques, des industries culturelles et créatives, des langues, du tourisme. Tous et toutes mobilisent des capacités à s'impliquer.

L'approche proposée dans ce numéro suit trois trajectoires : étendre l'inscription de l'écologie dans les politiques publiques de la recherche ; soutenir-concilier-réassurer pour une meilleure prévisibilité ; acquérir et maîtriser de nouvelles connaissances. Toutes ces actions tentent de répondre à la volonté de protection de ce qui fait « culture commune », ce à quoi nous tenons. La recherche culturelle investit aujourd'hui un espace-temps complexe : l'ère de la « transition écologique » est en train de devenir une « culture des transitions ».

## Numéros récents



n° 145 – Automne-hiver 2023



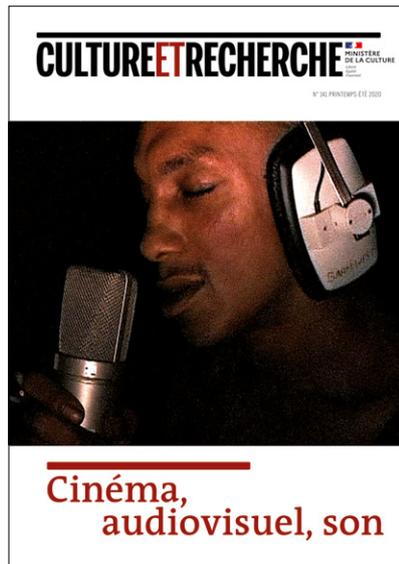
n° 144 – Printemps-été 2023



n° 143 – Automne-hiver 2022



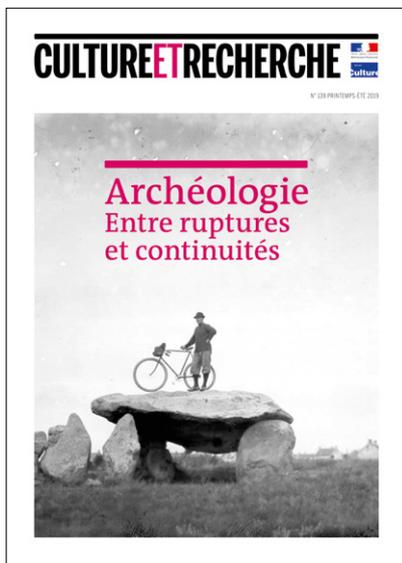
n° 142 – Printemps-été 2022



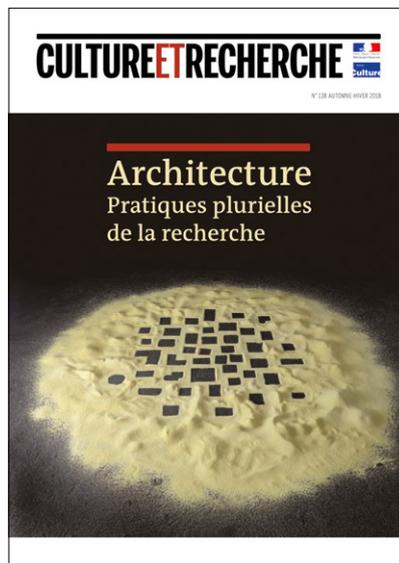
n° 141 – printemps-été 2022



n° 140 – Hiver 2019-2020



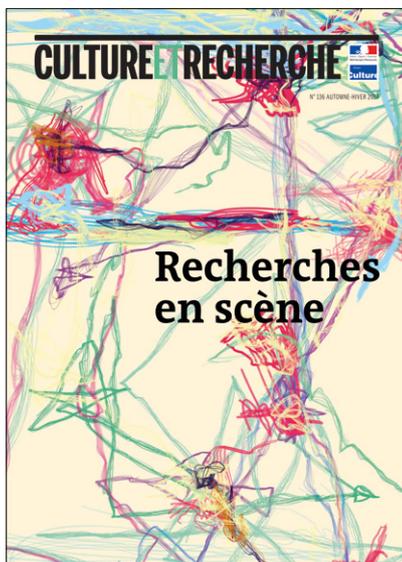
n° 139 – Printemps-été 2019



n° 138 – Automne-hiver 2018



n° 137 – Printemps-été 2018



n° 136 – Automne-hiver 2017



n° 135 – Printemps-été 2017



n° 134 – Hiver 2016-2017

# CULTURE ET RECHERCHE

## COMITÉ ÉDITORIAL ET PROGRAMMATION

Le comité éditorial est piloté par la Sous-direction Formation-Recherche et son bureau de la recherche au sein de la Délégation générale à la transmission, aux territoires et à la démocratie culturelle. Ses membres représentent :

- La délégation générale à la langue française et aux langues de France.
- Le département des études, de la prospective, des statistiques et de la documentation, Secrétariat général.
- La direction générale de la création artistique.
- La direction générale des médias et des industries culturelles.
- La direction générale des patrimoines et de l'architecture.

Directeur de la publication : **Gaëtan BRUEL** / Directeur de cabinet de la ministre de la Culture

Rédactrice en chef : **Catherine GRAINDORGE** / Délégation générale à la transmission, aux territoires et à la démocratie culturelle / Sous-direction des formations et de la recherche

## COMITÉ ÉDITORIAL

### **Solène BELLANGER**

Cheffe de la Mission Recherche / Direction générale de la création artistique / Sous-direction des enseignements spécialisés et supérieur et de la recherche

### **Laurence BIZIEN**

Chargée d'études documentaires, École nationale supérieure d'architecture de Nantes / Centre de recherche nantais Architectures Urbanités (CRENAU)

### **Jean-Christophe BONNISSENT**

Chargé de mission / Délégation générale à la langue française et aux langues de France / Mission Emploi et diffusion de la langue française

### **Bastien CHASTAGNER**

Chef du bureau Accès aux archives et de l'animation du réseau / Service interministériel des Archives de France / Sous-direction du pilotage, de la communication et de la valorisation des archives

### **Claire CHASTANIER**

Adjointe à la Sous-directrice des collections / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Service des Musées de France / Sous-direction des collections

### **Christian CRIBELLIER**

Adjoint au Sous-directeur / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Service du patrimoine / Sous-direction de l'archéologie

### **Aude CROZET**

Chargée de mission / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Service du patrimoine / Sous-direction de l'archéologie / Bureau du patrimoine archéologique

### **Brigitte GUIGUENO**

Adjointe au Sous-directeur / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Service interministériel des archives de France / Sous-direction du pilotage, de la communication et de la valorisation des archives

### **Camille HERFRAY**

Chargée de mission / Direction générale de la création artistique / Sous-direction des enseignements spécialisés et supérieur et de la recherche / Mission recherche

### **Judith KAGAN**

Cheffe du bureau de l'expertise et des métiers / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Service du patrimoine / Sous-direction des Monuments historiques et des sites patrimoniaux

### **Isabelle-Cécile LE MÉE**

Chargée de mission / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Délégation à l'inspection, à la recherche et à l'innovation

### **Pascal LIÉVAUX**

Adjoint au Chef de la Délégation / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Délégation à l'inspection, à la recherche et à l'innovation

### **Jean-Gabriel MINEL**

Chargé de mission / Direction générale des médias et des industries culturelles

### **Wilfried MULLER**

Chargé de mission / Direction générale des médias et des industries culturelles / Service du Livre et de la Lecture / Département des bibliothèques / Bureau du patrimoine

### **Carine PRUNET**

Adjointe au chef du bureau de la diffusion numérique des collections / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Service des Musées de France / Sous-direction des collections

### **Pierre-Jean RIAMOND**

Chef du bureau du patrimoine / Direction générale des médias et des industries culturelles / Service du Livre et de la Lecture / Département des bibliothèques

### **Éric ROUARD**

Chef de la Mission de la politique documentaire / Secrétariat Général / Département des études, de la prospective, des statistiques et de la documentation / Mission de la politique documentaire

### **Miguel SAYOUS**

Chargé de mission / Secrétariat Général / Département des études, de la prospective, des statistiques et de la documentation / Mission de la politique documentaire

### **Valérie WATHIER**

Adjointe à la Cheffe de bureau / Direction générale des patrimoines et de l'architecture / Service de l'architecture / Sous-direction de l'enseignement supérieur et de la recherche en architecture / Bureau des enseignements

---

# CULTURE ET RECHERCHE



Créée en 1985, la revue *Culture & Recherche* présente et explicite la recherche culturelle menée au sein du ministère de la Culture dans toutes ses composantes : patrimoines, création, médias, industries culturelles, développements technologiques appliqués au secteur culturel.

Chaque numéro est consacré à un axe prioritaire de l'action du ministère dont les travaux sont menés par les acteurs et partenaires de la recherche culturelle financée et soutenue par le ministère de la Culture. La revue a pour objectif de diffuser et de rendre visible la recherche culturelle auprès d'un public élargi de professionnels du secteur culturel et de la recherche. Elle offre un regard sur l'actualité de la recherche culturelle développée au sein des différentes structures du ministère (établissements, structures de recherche, laboratoires, réseau des écoles de l'Enseignement supérieur Culture) et de celles qui s'inscrivent, notamment, dans l'accord-cadre avec le CNRS, en vigueur depuis 1992, la stratégie ministérielle de recherche ou les appels à projets spécifiques.

---

L'Intelligence artificielle (IA ou AI pour *Artificial Intelligence*) irrigue depuis plusieurs décennies l'ensemble de la société. Entre peur et fascination, elle est porteuse de changements radicaux, notamment pour la recherche Culture.

L'IA s'est développée durant plus de 70 ans et de nombreux jalons ont ponctué son développement, en lien avec une maîtrise des données de plus en plus grande et une puissance de calcul exponentielle, jusqu'à rencontrer le grand public avec des « agents conversationnels » de type ChatGPT (*Generative Pre-trained Transformers*) en 2022.

On distingue aujourd'hui « l'IA symbolique » (réseaux neuronaux et « systèmes experts ») de « l'IA d'apprentissage automatique » qui repose sur « l'apprentissage machine » et peut reproduire un certain nombre de tâches à partir de données et de statistiques. « L'IA générative » est un domaine de « l'IA d'apprentissage » : elle est capable de générer automatiquement des contenus (texte, image, son, vidéo, etc.).

Ce numéro 147 de *Culture & Recherche* présente ces nouveaux usages de l'IA dans la recherche. Au-delà des avancées technologiques, des travaux souvent exploratoires sont menés, renforçant encore la recherche pluridisciplinaire et illustrant de nouveaux enjeux scientifiques, épistémologiques, méthodologiques et sociétaux.

---

Directeur de la publication : **Gaëtan BRUEL**  
Directeur de cabinet de la ministre de la Culture

Rédactrice en chef : **Catherine GRAINDORGE**  
Délégation générale à la transmission, aux territoires  
et à la démocratie culturelle / Sous-direction  
des formations et de la recherche

Impression : Service de diffusion de la Gendarmerie  
87000 Limoges

ISSN papier : 0765-5991 – ISSN en ligne : 1950-6295

Réalisation : **Transfaire**  
contact@transfaire.com

 **PEFC** 10-31-2190 / Certifié PEFC

 **IMPRIM'VERT**

---