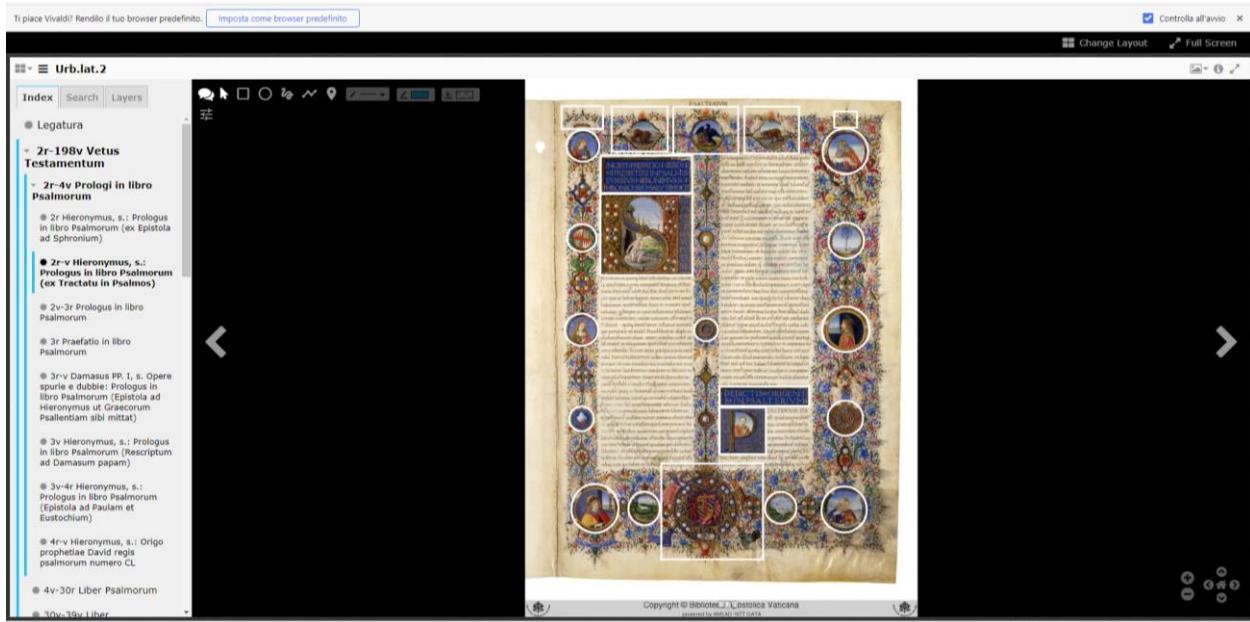


ÉCOLE NATIONALE DES CHARTES
UNIVERSITÉ PARIS, SCIENCES ET LETTRES

Camille Ferrari



Bibbia urbinate da Federico da Montefeltro, Urb. Lat. 2, Folio 2 recto, Biblioteca apostolica vaticana

L'intelligence artificielle et les nouveaux outils techniques de recherche au service des corpus iconographiques: préserver, valoriser, transmettre.

Le cas pratique de la Bibliothèque apostolique vaticane et de la zoologie médiévale.

**Mémoire pour le diplôme du master
« Technologies numériques appliquées à l'histoire »
2024**

Résumé :

Le présent mémoire a été rédigé à la suite d'un stage de trois mois et demi au sein du service de la coordination des services informatiques de la Bibliothèque apostolique vaticane (BAV) à Rome, en vue de l'obtention du master « Technologies numériques appliquées à l'histoire » de l'École nationale des chartes. Durant ce stage, nous avons travaillé sur l'expérimentation de l'intelligence artificielle (IA) appliquée aux fonds patrimoniaux numérisés de la Vaticane. Le projet visait à soutenir la recherche et à valoriser numériquement les collections numérisées en utilisant un réseau de neurones convolutif. Le but était d'identifier les espèces d'animaux qui occupent les pages des manuscrits et de générer automatiquement des annotations IIIF pour chaque animal identifié.

D'une part, le mémoire cherche à examiner chaque étape du projet, afin de présenter une analyse approfondie des méthodes utilisées et des résultats obtenus. D'autre part, l'observation qui y est entreprise cherche à dresser une analyse des répercussions de l'arrivée de l'intelligence artificielle dans le domaine du patrimoine. Ce travail aborde la création de plateformes et d'outils numériques utilisant l'IA pour les chercheurs en histoire de l'art. Il évoque des pistes de réflexion sur les évolutions de paradigme en termes d'interopérabilité, d'accessibilité et de médiation des collections qu'entraînent ces nouveaux instruments.

Mots-clefs : intelligence artificielle ; deep learning ; métadonnées ; IIIF ; interopérabilité ; XML-TEI ; JSON; histoire de l'art ; manuscrits; Moyen Âge ; médiation numérique;

This dissertation was written following a three-and-a-half-month internship in the IT services coordination department of the Vatican Apostolic Library in Rome, in preparation for the master's degree in "Digital technologies applied to history" at the École nationale des chartes. During this internship, the team worked on the experimentation of artificial intelligence on the Vatican's digitized heritage collections. The project aimed to support research and digitally enhance the digitized collections by using a convolutional neural network to identify the animal species occupying manuscript pages and automatically generate IIIF annotations for each animal identified.

On one hand, the dissertation seeks to examine each stage of the project, in order to present an in-depth analysis of the methods used and the results obtained. On the other hand, it seeks to reflect on the implications of the arrival of artificial intelligence in the heritage field. This work addresses the creation of platforms and digital tools using artificial intelligence for art history researchers. It evokes avenues for reflection on the paradigm shifts in terms of interoperability, accessibility and mediation of collections that these new tools entail.

Keywords: artificial intelligence; deep learning; metadata; IIIF; interoperability; XML-TEI; JSON; art history; manuscripts; Middle Ages; digital mediation;

Remerciements :

Je souhaiterais tout d'abord remercier ma responsable de master Mme Emmanuelle Bermès pour son indéfectible soutien, ses retours constructifs et son implication dans l'encadrement de la rédaction de ce mémoire. Il n'aurait pu exister sans elle.

Je tiens à remercier Paola Manoni et Giuliano Giuffrida, mes responsables de stage qui ont eu la patience de supporter mon accent français, mes remarques de jeune novice et de me former pendant trois mois et demi de stage. Merci à toute l'équipe de la coordination informatique qui a également dû composer avec mes barbarismes franco-italien à chaque pause-café.

Mes années d'étude s'achèvent par un défi dans une bibliothèque des plus déconcertantes où je ne pensais jamais pouvoir rentrer. Je tiens à remercier toute l'équipe de la Bibliothèque apostolique du Vatican et notamment Cleo Maecci, Pierre Chambert-Protat, Claudia Montuschi, Don Giacomo Cardinali et le directeur d'école de bibliothéconomie de la BAV, Antonio Manfredi, pour leurs précieux conseils. Merci à Emmanuelle Turquemme, Cécile Martini et Raffaela Carchesio, respectivement archiviste, responsable de la bibliothèque de l'École française de Rome et bibliothécaire de la Villa Médicis, pour leur accueil.

Mes remerciements vont également à Edward Gray, mon directeur de stage, à Amel Fraisse pour sa journée d'études, à Chloé Fixe pour ses conseils de rédaction ainsi qu'aux personnes consultées pour l'écriture de ce mémoire qui ont eu la gentillesse de me répondre, Marion Charpier, Mathilde Daugas, Pierre-Olivier Dittmar, Rémy Coordonier, Nathalie Ryser et Alexandre Tur.

Merci à Mathilde D. , Ezilda, Mathilde F. , Romane et à l'ensemble de l'équipe du Musée du Grand Siècle pour leurs précieuses relectures.

Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans le soutien indissoluble de Clémence pendant ces années de master. Je lui adresse toute ma reconnaissance.

Ma gratitude va au Préfet de la Bibliothèque apostolique vaticane, Don Mauro Mantovani, pour sa gentillesse, son écoute, ses conseils, ainsi qu'à l'ensemble du *Centro Culturale Paolo VI di Sant'Ivo alla Sapienza*. Ce mémoire est avant tout l'aboutissement d'une expérience à l'étranger qui aurait été bien différente sans eux.

Enfin merci à mes parents pour leur soutien et leur confiance durant l'entièreté de mon parcours universitaire et à mon frère pour ses références sur les jeux vidéo historiques.

Liste des sigles et abréviations

API : Application Programming Interface

ARL: Association of Research Libraries

BAV : Bibliothèque Apostolique Vaticane / La Vaticane

BnF : Bibliothèque nationale de France

BNU : Bibliothèque Nationale et Universitaire de Strasbourg

CLEMM : Classification of Latin Medieval Manuscripts

CNN : Convolutional Neural Network

COCO: Common Object In Context

DL: Deep Learning

EHESS : École des hautes études en sciences sociales

IA : Intelligence Artificielle

ICOM : International Council Of Museums

IFLA : International Federation of Library Associations and Institutions

IIIF : International Image Interoperability Framework

INHA : Institut National d'Histoire de l'Art

IRHT : Institut de Recherche et d'Histoire des Textes

JSON : JavaScript Object Notation

METS : Metadata Encoding and Transmission Standard

ML : Machine Learning

OCR : Optical Character Recognition

SGoB : Saint George on a Bike

TEI : Text Encoding Initiative

URL : Uniform Resource Locator

W3C : World Wide Web Consortium

XML : Extensible Markup Language

YOLO : You Only Look Once

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	8
I/ L'Évolution de l'histoire de l'art face à de nouveaux outils	11
1) Une discipline en mouvement.....	11
A. <i>Digital Art History</i>	11
B. L'arrivée de l'intelligence artificielle dans le patrimoine culturel	13
C. Projets nationaux et internationaux de l'utilisation de l'IA sur des collections iconographiques	18
2) La situation à la Bibliothèque apostolique vaticane.....	24
A. Les projets numériques de la Bibliothèque apostolique vaticane (BAV) avant 2023	24
Le projet « Proof of Concept » (2015).....	24
Le projet « Mellon » en collaboration avec Stanford (2016-2019).....	25
Résultats et perspectives :	32
B. De l'acquisition à la numérisation des fonds de la Vaticane.....	32
II/ La mise en pratique de l'intelligence artificielle sur des fonds patrimoniaux.....	39
1) La Vaticane et le numérique.....	39
A. Appliquer l'IA aux manuscrits : protocole et fonctionnement	39
B. Les limites du <i>deep learning</i>	45
C. Codicologie et numérique font-ils bon ménage ?	47
2) Quelques tentatives d'utilisation de l'IA sur les collections en bibliothèques et en musées	53
A. La conservation.....	53
B. La recherche iconographique	56
C. La restauration	63
III/ Quels enjeux pour les institutions culturelles face à l'IA ?	71
1) L'IA, une promesse d'accessibilité ?.....	71
A. Comment l'IA modifie les institutions culturelles et leurs services	71
B. Interopérabilité et standard IIIF	75
C. Les limites de la « découvrabilité »	82
2) Le bestiaire et l'IA, fausse bonne idée ?	84
A. À la recherche des animaux dans les manuscrits papaux	84
B. Intelligence artificielle et médiation culturelle	91
CONCLUSION.....	99
ANNEXES	101
Annexe A : Tableau présentant l'ensemble des manuscrits comportant des annotations de représentations d'animaux, au cours des siècles et selon leur lieu de provenance.....	101

Annexe B : Liste des manuscrits utilisés pour le projet et nombre d'annotations de représentations d'animaux par manuscrits	102
Annexe C : Extrait des “tags” (étiquettes) créées à la main et utilisés pour naviguer dans les fonds sur la plateforme Spotlight.....	105
Annexe D : Présentation détaillée des fonds	106
Bibliographie :	114

Tables des figures

Fig. 1, Représentation des différentes strates qui composent l'IA.....	15
Fig. 2, Illustration du processus du <i>Deep Learning</i> d'une image à une étiquette.....	17
Fig. 3, Capture d'écran, Corpus de Zoologie, projet GallicaPix.....	20
Fig. 4, Urb. Lat. 365, Dante Alighieri, <i>Divina Commedia</i>	27
Fig. 5, Tags de l'exposition virtuelle <i>Viaggiare con Dante</i>	28
Fig. 6, Sous-partie de l'exposition <i>Classici Latini, Evoluzione e trasmissione di opere classiche</i>	29
Fig. 7, Vat. Gr. 308 pt 1, Folio Ir.[02.wl.0000].....	30
Fig. 8, Folio Ir.[03.wl.0000]	31
Fig. 9, Sous-partie de l'exposition « Paléographie latine », « L'écriture de Bénévent au XIe siècle : Bari et Cassinese »	37
Fig. 10, Détail du Vat.lat.1202 illustrant la sous-partie « L'écriture de Bénévent au XIe siècle : Bari et Cassinese».	38
Fig. 11, Illustration du processus du <i>Deep Learning</i> d'une image à une étiquette.	40
Fig. 12, Schéma de la segmentation effectuée par l'algorithme sur une page de manuscrit....	41
Fig. 13, Capp. Giulia. XII. 4, folio 73 verso, Palette de couleurs et clef de musique ayant faussé les résultats de l'algorithme.....	42
Fig. 14, Processus d'utilisation du CNN de la numérisation du manuscrit jusqu'à reconnaissance d'un objet	44
Fig. 15, Cappon.285; folio 29 recto.	44
Fig. 16 et Fig. 17, Reg.lat.99; folio 39 verso, Identification par le réseau neuronal d'ours en peluche et de bat de baseball.....	46
Fig. 18, Vat. gr. 1613, folio 50. Correction à la main de l'identification d'un lion.....	46
Fig. 19, Page d'accueil avec menu déroulant de l'exposition virtuelle « Bibliothèque d'un prince humaniste ».	49
Fig. 20, Cappon. 237. Pt. 1, Folio 4(02) recto, illustration d'une erreur commise par l'IA, qui a confondu un oiseau avec un trou.	50
Fig. 21, Urb. 365, folio 84 recto, la machine n'a pas repéré l'animal dans le manuscrit.....	51
Fig. 22, Urb. Lat. 365, Folio 106r, la machine a identifié un oiseau.....	51
Fig. 23, Idée de mécanisme pour optimiser la lecture.....	57
Fig. 24, Démonstration de l'utilisation du scanner Réplica.	58
Fig. 25, Représentation de Léda.....	60
Fig. 26, Représentation de Léda.....	61
Fig. 27, Représentation de Lucretia	61
Fig. 28, Représentation de Cléopâtre.	62
Fig. 29, Géricault, <i>Le Radeau de la Méduse</i>	63

Fig. 30, Rembrandt, <i>La Ronde de Nuit</i>	65
Fig. 31, Rouleau calciné d'Herculaneum	66
Fig. 32, Picasso, <i>Miséruse Accroupie</i> et sous la toile, Rusinol, <i>Parc del Laberint d'Horta</i> ..	68
Fig. 33, Picasso, <i>Miséruse Accroupie</i> et sous la toile, Rusinol, <i>Parc del Laberint d'Horta</i> ..	68
Fig. 34, Impression de la toile de Rusinol, <i>Parc del Laberint d'Horta</i>	69
Fig. 35, L'Impression en 3D, utilisée pour le projet Oxia Palus	70
Fig. 36, Vat. estr. Or. 159, Identification d'oursons en peluche par l'IA au lieu de personnes japonaises	72
Fig. 37, Fig. 37, Urb. Lat. 1, métadonnées du manuscrit	77
Fig. 38, Urb. Lat. 1, fenêtre Mirador avec des annotations sur le manuscrit	80
Fig. 39, Vat. lat. 14701, Folio 335 recto, l'IA a confondu des taureaux et des chevaux.....	86
Fig. 40, Vat. gr. 699, Folio 75 recto, l'IA a pris des lions pour des chiens.....	86
Fig. 41, Vat. lat. 14701, Folio 310 verso, L'intelligence artificielle a confondu le lion de Saint Jérôme avec un chien..	87
Fig. 42, Résultat d'une recherche ayant pour étiquette « Teddy Bear ». Les Saints ont été sélectionnés à cause de leurs auréoles	90
Fig. 43, Sous-partie de l'exposition virtuelle « Sublimes animaux », créée par l'Armarium..	92
Fig. 44, Logo de l'application Fabricabrac	93
Fig. 45, Affiche du festival <i>Press Start 2021</i> sur le thème du jeu vidéo et du bestiaire médiéval	94
Fig. 46, Jeu vidéo de stratégie « Inkulinati »	95
Fig. 47, Captures d'écrans du jeu vidéo <i>A Plage tale innocence</i> et des deux manuscrits qui y sont représentés, le livre d'heures de Catherine de Clèves (vers 1440) et le livre d'heures dit de Fentener van Vlissingen (1430-1435).	96
Fig. 48, Panorama de la ville de Bagdad, dans le jeu <i>Assassin's Creed Mirage</i>	97
Fig. 49, Plan de la ville de Bagdad dans le jeu vidéo <i>Assassin's Creed Mirage</i>	98

INTRODUCTION :

En 1953, dans une préface au catalogue d'une exposition de manuscrits italiens du Moyen Âge et de la Renaissance à la Morgan Library¹, l'historien de l'art Bernard Berenson écrit :

« Les manuscrits enluminés ne sont pas facilement accessibles au public, et ce pour de bonnes raisons. La plupart d'entre eux sont encore dans des codices et ne peuvent être montrés que deux pages à la fois. Il n'y a pas d'autre solution que d'extraire les feuilles et de les exposer séparément. Ceci n'est pas recommandable car cela leur enlève leur caractère d'illustration de livre et les rend susceptibles soit de perdre ou de changer de couleur, soit de se décolorer à cause d'une exposition permanente à la lumière. En outre, nombre d'entre eux sont trop fragiles, à tel point que la plupart des conservateurs de manuscrits enluminés préféreraient les garder comme des houris dans un harem. Il n'est pas rare qu'ils interdisent l'accès à leurs trésors en exigeant de l'amateur d'art une déclaration écrite indiquant où et quand il compte publier les manuscrits qu'il souhaite simplement regarder. Le seul compromis est de les montrer du mieux que l'on peut sous verre, et seulement pour une courte période. »

Difficile d'imaginer que soixante ans plus tard, la Bibliothèque apostolique vaticane lancerait un programme d'intelligence artificielle sur ses manuscrits. L'irruption de la technologie numérique a modifié la manière de concevoir l'objet-livre. L'arrivée d'Internet, les progrès numériques et le développement des métadonnées ont permis un accès à distance de trésors autrefois calfeutrés, parfois de manière encore plus performante grâce à la précision des numérisations.

Cette accessibilité nouvelle a modifié les pratiques de recherche des chercheurs. Autrefois plongés dans la matérialité des manuscrits, ils sont désormais concentrés sur leur écran d'ordinateur, naviguant entre les bases de données en ligne des institutions culturelles. Le paradoxe de cette disponibilité réside dans l'immense masse de données qu'il leur est désormais possible de consulter et qui peut donner le tournis. Trouver la bonne information, la bonne indication, relève du parcours du combattant et demande de maîtriser tant sa discipline et ses sources que les outils informatiques de chaque plateforme. De nouveaux défis émergent de ces transformations : Comment rendre ces données accessibles ? Comment les relier entre elles, permettre leur (re)découverte ?

Un véritable enjeu réside dans le développement d'outils performants pour retrouver les données les plus pertinentes possibles dans cette abondance. D'autant que le grand public également a désormais accès numériquement à ces objets patrimoniaux. Ils peuvent non seulement consulter en ligne les collections mais aussi se les approprier, les utiliser et même jouer avec, comme en témoignent les bornes numériques de la Salle Ovale du Site Richelieu de la BnF à Paris. Les usagers ont ainsi la possibilité de découvrir une restauration d'ouvrage, de

¹ HARRSEN (Meta) et BOYCE (George K.), *Italian manuscripts in the Pierpont Morgan Library : descriptive survey of the principal illuminated manuscripts of the sixth to sixteenth centuries, with a selection of important letters and documents*, éd. New York : sn, 1953.

voyer dans le Nautilus de *Vingt Mille Lieues sous les mers* ou de s'amuser à retrouver les animaux cachés dans des estampes japonaises.

La disponibilité de ces collections met donc au premier plan l'importance d'élaborer des outils de valorisation et de médiation en conséquence.

Le stage présenté dans ce mémoire découle de ces préoccupations. La Bibliothèque apostolique vaticane est réputée pour sa difficulté d'accès. Deux contrôles de police et un contrôle d'accès à l'entrée du bâtiment sont nécessaires pour espérer parvenir dans le hall d'accueil de la bibliothèque. Une justification solide doit être apportée pour pouvoir monter dans les étages supérieurs et parvenir à apercevoir les ouvrages. L'enjeu d'accessibilité des collections y est donc particulièrement important, ce que le service de la coordination des services informatiques a bien saisi.

Ce stage s'est déroulé au cours de l'élaboration du dernier projet du service : l'expérimentation de l'application de l'intelligence artificielle sur les fonds patrimoniaux numérisés de la Vaticane. Ce projet se situait dans la continuité des précédents projets de valorisation numérique de la bibliothèque, et notamment la création en 2019 d'une plateforme présentant les métadonnées de chaque manuscrit, accompagnées de fenêtres avec des *viewer mirador* des dits manuscrits. Ce nouveau programme s'articulait dans cette lignée de valorisation numérique et avait pour but d'employer un réseau de neurones convolutif (ou CNN, *convolutional neural network* en anglais) sur les collections numérisées pour identifier les espèces d'animaux qui peuplent les pages des manuscrits et créer automatiquement des annotations IIIF pour chaque animal identifié.

Dans ce mémoire nous tentons d'une part, d'analyser chacune des étapes ayant segmenté le projet, dans le but de fournir une étude détaillée des méthodes employées et des résultats obtenus. D'autre part, la réflexion qui y est menée s'élargit pour brosser un portrait non exhaustif des conséquences de l'arrivée de l'intelligence artificielle dans le domaine du patrimoine.

Dans une première partie, nous revenons sur le contexte du projet du stage, sur les fonds patrimoniaux utilisés pour ce faire et sur l'état de l'art de l'intelligence artificielle appliquée au patrimoine ces dernières années. Il rappelle l'amélioration technique de l'intelligence artificielle qui lui a permis de devenir pertinente sur les images et ce que cela implique en termes de maniement et de mise à disposition des fonds iconographiques pour les chercheurs.

Dans une seconde partie, le processus d'utilisation de l'intelligence artificielle est explicité et les conséquences codicologiques qui en ressortent sont évoquées. Des exemples non exhaustifs d'utilisations récentes d'intelligence artificielle sur des collections d'art et d'histoire de l'art sont analysés.

Enfin, dans une troisième partie, le mémoire ouvre de nouvelles pistes de réflexions sur les changements de paradigme que les nouveaux outils numériques entraînent en termes d'interopérabilité, d'accessibilité et de médiation des collections pour tous.

Le mémoire tente de répondre à la problématique de l'évolution de la pratique de la recherche dans des fonds patrimoniaux avec l'arrivée de nouveaux outils numériques et notamment l'intelligence artificielle. Quel est le champ d'actions concret de cette dernière, ses possibilités et ses limites ? Ce domaine étant en évolution rapide et constante, le présent travail est un point

de vue contemporain et ponctuel de ces questions. Nul doute que ces interrogations tout comme leurs réponses sont amenées à évoluer, et ce très rapidement.

I/ L'Évolution de l'histoire de l'art face à de nouveaux outils

1) Une discipline en mouvement

A. *Digital Art History*

Ce mémoire tient pour sujet principal un stage mené à la Bibliothèque apostolique vaticane d'avril à juillet 2023. Son existence a tout d'abord vu le jour suite à l'émanation d'une véritable curiosité quant à étudier comment une bibliothèque, aussi ancienne historiquement et ancrée dans la religion, avait effectué sa mue numérique pour rentrer dans le XXI^e siècle.

En réalité, il est apparu dès le début de nos recherches que le lien entre religion et travaux numériques possédait des racines bien plus anciennes. Pour de nombreux spécialistes de la discipline, ce sont les travaux du père Roberto Busa qui ont ouvert la voie aux humanités numériques et à l'approche des sciences humaines par le numérique². Entre la fin des années 1940 et le début des années 1950, ce jésuite met en place avec l'International Business Machines Corporation (IBM)³ un projet pour informatiser l'index de l'œuvre de Thomas d'Aquin (*l'Index Thomisticus*). Ce projet a permis de créer une concordance de 179 textes centrés sur Thomas d'Aquin et a indexé 631 980 mots sur une période de 34 ans, initialement sur des cartes perforées. Pour la première fois était démontré l'intérêt de l'informatique pour la recherche en sciences humaines. Le nouveau préfet de la Bibliothèque apostolique vaticane, Don Mauro Mantovani, nommé en mars 2023, quelques semaines avant le début du présent projet, et spécialiste de Thomas d'Aquin, était donc particulièrement enclin à entendre parler d'un dispositif d'intelligence artificielle. Les acteurs changent, les supports évoluent, de nouveaux outils se développent mais le désir humaniste de rendre accessible les fonds de la Vaticane restait le même.

Le numérique semble investir divers champs des sciences humaines depuis un moment. Pour citer Hélène Dessales, maîtresse de conférences en archéologie à l'École normale supérieure de Paris : « l'informatique est en train de révolutionner l'archéologie »⁴. Le domaine de l'histoire de l'art n'est pas en reste. La notion anglo-saxonne de *Digital Art History* a vu le jour dans les années 1970⁵. L'expression "Digital Art History" ne fait pas référence ici à l'histoire de l'art numérique en tant que genre artistique, mais plutôt aux pratiques numériques utilisées dans la recherche en histoire de l'art.

² SINATRA (Michaël E.) et VITALI-ROSATI (Marcello), « Chapitre 3. Histoire des humanités numériques », dans *Pratiques de l'édition numérique*, éd. M.E. Sinatra, Montréal, 2014 (Parcours numérique), p. 49-60. URL : <https://books.openedition.org/pum/317>. Consulté le 31 août 2024. ISBN : 9782821850729.

³ C'est une entreprise multinationale américaine présente dans les domaines du matériel informatique, du logiciel et des services informatiques (source : Wikipédia)

⁴ « Les entretiens autour de l'informatique », *Le Monde*, 10 décembre 2014. URL : <https://www.lemonde.fr/blog/binaire/les-entretiens-de-la-sif/>. Consulté le 31 août 2024.

⁵ COURTIN (Antoine), « Digital Art History: une tentative de définition », *Medium*, 10 octobre 2016. URL : <https://medium.com/@seeksanusername/digital-art-history-une-tentative-de-d%C3%A9finition-6b3c3f288683..> Consulté le 3 août 2024.

Cette notion a notamment été développée dans les articles de Johanna Drucker et de Pamela Fletcher, qui ont notamment distingué la *Digitizing Art History* de la *Computational Art History*⁶.

La première expression désigne l'accès aux contenus numériques et leurs utilisations par les chercheurs (numérisation, catalogues, base de données, *etc.*). Cette problématique n'est pas nouvelle comme en témoigne la mise en ligne de bases de données nationales dans les années 1990 telles « Joconde » ou « Mérimée ». Ces accès numériques se sont développés de manière exponentielle ces dernières années grâce à une prise de conscience de l'importance des métadonnées et des interfaces intuitives. Face à cet accroissement de ressources, de nouveaux champs de recherches ont vu le jour, favorisant une interdisciplinarité entre numérique et histoire de l'art. C'est de ce mouvement, désigné sous le nom de *Computational Art History*, que découle notre projet.

Quatre grandes branches de ces nouvelles analyses « computationnelles » sont généralement identifiées : l'analyse textuelle, l'analyse d'image, l'analyse de réseaux et l'analyse spatiale. Ces méthodes nécessitent des compétences à la fois en histoire de l'art et en ingénierie des connaissances. Dans notre cas, c'est l'analyse d'images et plus précisément l'utilisation de l'intelligence artificielle sur une base de données iconographiques qui est mise en lumière.

De nos jours, l'accès aux images en ligne est devenu familier et courant⁷. Avec la nouvelle aisance de cet accès les attentes quant à leur consultation augmentent également. Chaque institution tente à sa manière de rendre accessible le plus qualitativement possible ses fonds en ligne avec des métadonnées complètes et des outils de visualisation performants. De nouveaux projets hybrides ont vu le jour grâce à ces ressources : accès facilité à des documents parfois dispersés, intégration de ressources multimédias, lecture enrichie grâce à des liens hypertextes, intégration de pratiques collaboratives, *etc*⁸.

Ces nouvelles possibilités transforment notre rapport à la discipline et engendre de nouvelles problématiques. Le travail de Stephen Murray par exemple est représentatif de ces évolutions⁹. Il a développé une importante collection de modèles numériques de cathédrales gothiques en France. La superposition numérique de ces cathédrales le long d'un seul axe, de sorte que les variations de hauteur, de largeur et de proportion peuvent être comprises immédiatement, témoigne de l'intérêt d'un tel dispositif.

Accéder à des images, les manipuler, les analyser, les conserver, nous est désormais familier. La discipline tout entière de l'histoire de l'art se prête de plus en plus à ces nouvelles méthodes. La capacité de référencement croisé, de recherche, d'interrogation d'un index numérique démontre les avantages de la numérisation des documents s'ils sont correctement référencés. Cette capacité élève désormais des questions théoriques sur la manière dont nous pouvons

⁶ DRUCKER (Johanna), « Is There a “Digital” Art History? », *Visual Resources*, vol. 29, n° 1-2 (juin 2013), p. 5-13. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01973762.2013.761106>. Consulté le 3 août 2024.

⁷ *Ibid.*

⁸ CLAVERT (Frédéric), DANIEL (Johanna), FLECKINGER (Hélène) et al., « Histoire et humanités numériques : nouveaux terrains de dialogue entre les archives et la recherche », *La Gazette des archives*, vol. 245, n° 1 (2017), p. 121-134. URL : https://www.persee.fr/doc/gazar_0016-5522_2017_num_245_1_5519. Consulté le 3 août 2024.

⁹ « La géométrie de la cathédrale gothique de Beauvais : tracé directeur », *Les Cathédrales retracées* [s.d.]. URL : <https://www.cathedrales-gothiques.com/templates/la-geometrie-de-la-cathedrale-gothique-de-beauvais-trace-directeur-23>. Consulté le 31 août 2024.

montrer, exposer et examiner les nuances entre les ontologies, entre ces nomenclatures utilisées pour la classification des objets numériques.

Cette nouvelle accessibilité soulève de nouvelles interrogations : Comment trouver ce qui est en ligne, comment être capable de suivre la provenance des images numériques, vérifier l'authenticité et l'autorité des travaux d'érudition numérique ? Chaque image trouvée sur le Web l'est grâce à un moteur de recherche travaillant avec de multiples paramètres, dont les métadonnées. Nous sommes confrontés à de nombreux défis logistiques. Des nécessités tel que le besoin de normes d'édition, de nouveaux formats pour la recherche, de nouvelles procédures de conservation, de permissions et de droits, de portails et d'index à l'échelle internationale, émergent. La quantité excessive de données peut paradoxalement poser des problèmes et perturber la logique d'un historien. De plus, s'il n'y a pas d'informations de contexte, les risques de biais d'interprétation peuvent être accrus.

L'histoire de l'art numérique est donc également le théâtre d'un ensemble de débats intellectuels : comment les engagements numériques transforment-ils notre perception de ce qu'est un objet dans le cadre de ce stage, un manuscrit- comment est-il fabriqué, comment est-il produit, comment les approches à facettes de la classification et de la nomenclature peuvent-elles donner des éclairages utiles en histoire de l'art? Cette lecture distante de corpus massifs oblige l'historien à prendre garde aux conséquences de la médiation introduite par ces outils avec le risque d'arracher les sources primaires à leurs contextes d'origine. Les allers-retours entre lecture distante d'un corpus et lecture proche d'un ou de plusieurs documents en particulier, doivent rester possibles¹⁰.

Nous passons de conceptions statiques et matérielles d'un objet à des conceptions dynamiques et numériques. L'histoire de l'art numérique joue un rôle central dans la mise en œuvre de nouvelles façons de comprendre nos sujets d'étude et de les interpréter.

B. L'arrivée de l'intelligence artificielle dans le patrimoine culturel

Le terme « Intelligence artificielle » (que nous abrégeons par le sigle IA) a été inventé par John MacCarthy, qui en donne la définition suivante : « La science et l'ingénierie de la fabrication de machines intelligentes, en particulier de programmes informatiques intelligents. Elle est liée à la tâche similaire qui consiste à utiliser des ordinateurs pour comprendre l'intelligence humaine, mais l'IA ne doit pas se limiter aux méthodes qui sont biologiquement observables »¹¹.

L'intelligence artificielle englobe de nombreux domaines, tels que l'informatique, les mathématiques, la neuroscience et même la philosophie. Elle est aujourd'hui présente dans des secteurs variés allant des moteurs de recherche aux robots aspirateurs autonomes en passant par la création d'images. Elle repose sur des algorithmes capables d'adapter leurs calculs en fonction des traitements qu'elle doit réaliser. Les réseaux de neurones artificiels offrent la

¹⁰ CLAVERT (Frédéric), DANIEL (Johanna), FLECKINGER (Hélène) et al., « Histoire et humanités numériques : nouveaux terrains de dialogue entre les archives et la recherche », *La Gazette des archives*, vol. 245, n° 1 (2017), p. 121-134. URL : https://www.persee.fr/doc/gazar_0016-5522_2017_num_245_1_5519. Consulté le 3 août 2024.

¹¹ DRUCKER (Johanna), « Is There a “Digital” Art History? », *Visual Resources*, vol. 29, n° 1-2 (juin 2013), p. 5-13. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01973762.2013.761106..> Consulté le 3 août 2024.

possibilité de traiter de multiples sources d'informations provenant de grandes bases de données en réalisant de conséquents calculs.

Les premiers travaux menés sur l'intelligence artificielle ont débuté dans les années 1940. McCulloch et Pitts ont, par exemple, travaillé sur le premier modèle de neurones artificiels. Les chercheurs se sont concentrés sur les connexions entre neurones pour transmettre un signal. À l'époque, cette nouvelle discipline a suscité une curiosité importante devant la promesse que l'IA puisse imiter, à terme, le cerveau humain.

Remis en lumière depuis quelques années, le mathématicien Alan Turing est l'une des personnalités les plus célèbres du domaine de l'intelligence artificielle¹². En 1950, Turing publie son article « Computing Machinery and Intelligence » dans lequel est introduit le concept du test de Turing. Ce test avait pour enjeu de répondre à la question « une machine peut-elle penser ? » et de mesurer, ainsi, la capacité de l'intelligence artificielle à être confondue avec l'intelligence humaine. De nos jours, le test de Turing est toujours utilisé par les chercheurs, bien que sa pertinence soit régulièrement remise en cause¹³.

Selon le scientifique américain Marvin Lee Minsky, l'intelligence artificielle se définit comme « la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains, car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique »¹⁴. Cette définition associe l'aspect "artificiel" des ordinateurs et des processus informatiques aux caractéristiques "intelligentes" d'imitation de comportements humains, tels que le raisonnement et l'apprentissage.

Le retour des réseaux de neurones a également été observé à la fin des années 1980 avec son application à des problèmes spécifiques tels que la reconnaissance de caractères. Cependant, il faut attendre le milieu des années 2000 pour observer des résultats positifs sur des problèmes plus complexes et dans des domaines plus étendus.

La fin du siècle a été caractérisée par des périodes d'enthousiasme et de désillusion envers l'intelligence artificielle. Des méthodes d'apprentissage automatique ont été développées, mais leur efficacité était limitée par les puissances de calcul limitées et le manque de données d'entraînement.

Au début des années 2000, le Web 2.0, le *Big data* et de nouvelles infrastructures et capacités de calcul ont ouvert la voie à une exploration sans précédent de masses de données. Le projet *Blue Brain* a été lancé en 2005 dans le but de reproduire le cerveau de mammifères. L'utilisation de processeurs graphiques pour entraîner des réseaux de neurones a été introduite par le réseau neuronal convolutif AlexNet en 2012, ce qui a permis de développer les capacités de calcul spécifiques à l'apprentissage. Au cours des vingt dernières années, les algorithmes d'apprentissage automatique se sont perfectionnés et complexifiés. La reconnaissance d'images s'est de plus, beaucoup développée avec Facebook et Google.

¹² « Définition et Histoire - Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ? », *Intelligence artificielle & Data Analytics*, Coheris, [s.d.]. URL : <https://ia-data-analytics.fr/intelligence-artificielle/>. Consulté le 3 août 2024.

¹³ « L'Intelligence Artificielle face au test de Turing - Coheris », *Intelligence artificielle & Data Analytics*, Coheris, 21 novembre 2019. URL : <https://ia-data-analytics.fr/intelligence-artificielle/test-turing/>. Consulté le 31 août 2024.

¹⁴ « Définition et Histoire - Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ? », *op. cit.*

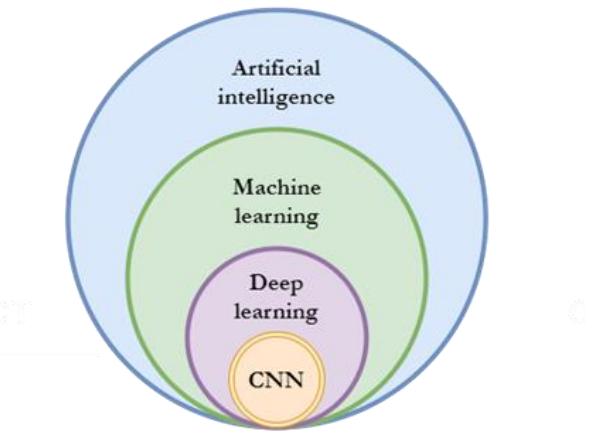


Fig. 1, Représentation des différentes strates qui composent l'IA. Source : © Camille Ferrari.

L'intelligence artificielle est souvent confondue avec l'apprentissage automatique (machine learning) et l'apprentissage profond (deep learning). Ces trois concepts sont différents et en réalité étroitement liés : l'intelligence artificielle comprend l'apprentissage automatique, qui lui-même comprend l'apprentissage profond ou deep learning (DL), (Fig.1).

Le *machine learning* (ML) peut être défini comme l'ensemble des techniques qui permettent de trouver la meilleure façon de représenter les données. Parmi ces approches, l'apprentissage occupe une place centrale. L'apprentissage implique de sélectionner les paramètres les plus appropriés pour décrire les données pour un modèle spécifique. Le ML permet à une machine d'apprendre et de stocker sa compréhension du monde.

Les modèles et les méthodes d'apprentissage qui leur sont associés comprennent des concepts issus des statistiques et des mathématiques, mais pas seulement. Les domaines de la physique, de la neurobiologie, de l'imagerie et de l'ingénierie ont également joué un rôle dans le développement de ces techniques.

L'intégration du *machine learning* dans les systèmes d'information est un enjeu considérable. En effet, bien souvent les données créées dans le passé ne correspondent pas aux attentes nécessaires à l'application de l'IA. L'un des plus importants enjeux de ces prochaines années réside dans la construction d'architectures de données permettant à l'IA de fonctionner.

Les algorithmes de *machine learning* sont classés en plusieurs catégories, correspondant à divers types d'apprentissage¹⁵ :

Apprentissage automatique

L'apprentissage automatique consiste à donner au modèle d'IA la capacité d'apprendre à réaliser une tâche plutôt que d'indiquer précisément comment il doit l'effectuer. Tout au long de l'apprentissage, le modèle contient des paramètres dont les valeurs sont modifiées. Il est

¹⁵ « Intelligence artificielle », dans Wikipédia, 2 septembre 2024. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Intelligence_artificielle&oldid=218276741. Consulté le 3 septembre 2024.

essentiel d'avoir un moyen d'évaluer la qualité des réponses fournies par le modèle pour l'apprentissage automatique. Les principales méthodes d'apprentissage sont :

Apprentissage supervisé

On délivre à l'algorithme un certain nombre d'exemples (*input*) sur lesquels il peut apprendre, et ces exemples sont « labellisés », c'est-à-dire qu'on leur attribue un résultat souhaité (*output*). L'objectif de l'algorithme est donc de déterminer la loi qui permet de déterminer le résultat souhaité (*l'output*) en fonction des données d'entrée (*input*).

Une illustration de cette méthode est la division des courriels en deux catégories : *Spam* (courrier indésirable) ou *Ham* (courrier non considéré comme du spam). Dans cette situation, les emails sont utilisés comme données d'entrée (*input*) et le résultat (*output*) est un label *Spam* ou *Ham*.

Apprentissage non supervisé

Le modèle reçoit un jeu de données, mais il n'est pas accompagné des réponses attendues.

Apprentissage auto-supervisé

On génère automatiquement un problème d'apprentissage supervisé à partir d'un jeu de données non annoté. Cela se fait généralement en dissimulant une partie des données (des mots d'un texte, des fragments d'images...) afin d'entrainer le modèle à les prédire.

Apprentissage par renforcement

Cet apprentissage fonctionne par la possibilité d'acquérir des compétences en s'entraînant.

Apprentissage profond (*deep learning*)

Le *deep learning* est une famille d'algorithmes de *machine learning* qui se basent sur le cerveau (c'est pourquoi on les désigne également sous le nom de « réseaux de neurones ») et qui ont démontré des performances importantes dans des tâches comme l'analyse d'images¹⁶.

Le réseau de neurones est composé de plusieurs couches entre les entrées et les sorties d'où l'emploi de l'adjectif *deep*, « profond » (Fig. 2). L'augmentation des données disponibles a contribué à l'amélioration de l'apprentissage profond. On le retrouve principalement dans les domaines de la vision par ordinateur, de la reconnaissance automatique de la parole et du traitement automatique des langues.

¹⁶ « Qu'est-ce que la Data Science ? », Saagie, 28 avril 2021. URL : <https://www.saagie.com/fr/blog/qu-est-ce-que-la-data-science/>. Consulté le 31 août 2024.

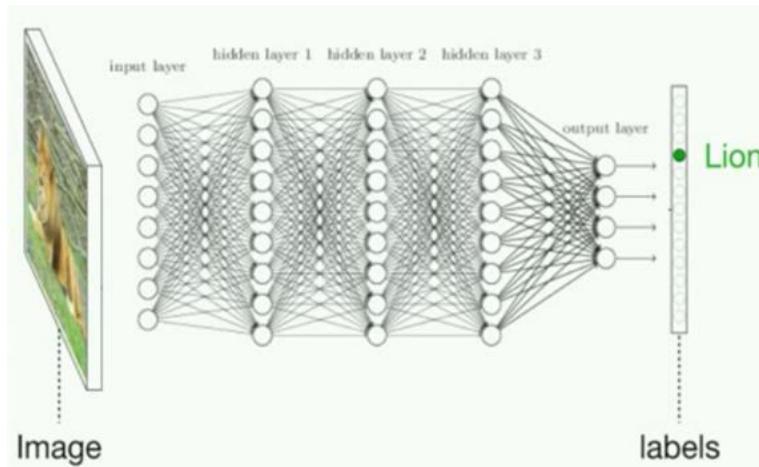


Fig. 2, Illustration du processus du Deep Learning d'une image à une étiquette. Source : MAINI (Vishal), « Machine Learning for Humans, Part 4: Neural Networks & Deep Learning », en ligne : <https://medium.com/machine-learning-for-humans/neural-networks-deep-learning-cdad8aeae49b>. Consulté le 5 août 2024.

En effet, grâce à l'évolution des technologies *Big Data*¹⁷, des limites importantes du *deep learning* ont été surmontées : l'insuffisance de données ne permettait pas pendant longtemps d'entraîner efficacement un algorithme prédictif. Avec l'arrivée d'Internet, les collaborations entre les différents groupes de recherche ont été renforcées, les résultats ont été communiqués plus rapidement et surtout, il est devenu possible de reproduire des expériences en utilisant des dépôts de données beaucoup plus conséquents. Les données constituent l'outil essentiel pour l'intelligence artificielle afin de saisir et d'acquérir des connaissances sur la façon dont l'intelligence humaine analyse les situations. Le *Big Data* offre ainsi la possibilité d'automatiser les traitements de données en accélérant la courbe d'apprentissage des ordinateurs utilisant le *machine learning*¹⁸.

Le *deep learning* vise généralement à anticiper le futur mais il peut aussi être conçu pour produire artificiellement de nouvelles données qui ressemblent statistiquement aux données originales, ou pour repérer des schémas de fonctionnement (de causalités...¹⁹).

Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont inspirés du fonctionnement du cerveau humain : les neurones sont généralement reliés à d'autres neurones en entrée et en sortie. Lorsqu'ils sont activés, les neurones d'entrée agissent comme s'ils votaient pour décider si un neurone intermédiaire doit être activé et transmettre ainsi un signal aux neurones de sortie. En réalité, dans le cas de l'équivalent artificiel, les « neurones d'entrée » ne sont que des chiffres et les poids de ce « vote » sont des paramètres modifiés pendant l'apprentissage.

¹⁷ « Concept permettant de stocker un nombre indicible de données sur une base numérique » (Source : « Qu'est-ce que le Machine Learning ou apprentissage automatique ? », *Intelligence artificielle & Data Analytics*, Coheris, [s.d.]. URL : <https://ia-data-analytics.fr/machine-learning/>. Consulté le 31 août 2024.)

¹⁸ *Ibid.*

¹⁹ Voir II/ 2) A. La conservation

Les réseaux neuronaux convolutifs, utilisés pour notre stage, sont particulièrement utilisés en traitement d'images. Leurs premières couches identifient des motifs relativement basiques et locaux comme des contours, là où les dernières couches traitent de motifs plus complexes. Leur fonctionnement précis et la procédure détaillée de leur utilisation lors de ce stage inaugure notre deuxième grande partie.

C. Projets nationaux et internationaux de l'utilisation de l'IA sur des collections iconographiques

Le 27 janvier 2020, fut publié un rapport sur l'intelligence artificielle et la culture²⁰. Il examinait de quelle manière l'intelligence artificielle pouvait être intégrée dans les domaines culturels, ainsi que les défis juridiques et économiques qui en découlaient. Selon le rapport, il était essentiel de poursuivre l'évaluation et l'adaptation du cadre juridique et économique afin de soutenir l'intégration de l'IA dans les domaines culturels.

Plus récemment, le 13 novembre 2023, le comité français du conseil international des musées (ICOM France) a organisé une soirée-débat intitulée « Et demain? Intelligence artificielle et musées ». La soirée a souligné les défis et les opportunités de l'intelligence artificielle dans les musées, notamment pour améliorer la gestion des collections et enrichir l'expérience des visiteurs.

De nombreux défis ont été soulevés comme l'importance de former les professionnels du secteur pour réussir à utiliser l'IA, mais aussi la fiabilité des données fournies, l'impact environnemental et les enjeux éthiques de cette technologie. Cette soirée a souligné l'implication des professionnels des musées dans l'exploration des opportunités offertes par l'IA tout en restant attentifs à ses conséquences éthiques et pratiques.

Différents projets sont en train de voir le jour nationalement et internationalement dans les institutions culturelles, et les bibliothèques ne font pas exception.

Nous allons nous concentrer sur les projets impliquant l'intelligence artificielle et les images. En effet les réseaux de neurones existent depuis longtemps mais ce n'est que récemment que leur perfectionnement a permis de rendre leur utilisation pertinente sur des images. Depuis une dizaine d'années, grâce aux progrès réalisés en termes de calculs et de données, les algorithmes et les infrastructures utilisés se sont nettement améliorés. Et de nouvelles recherches continuent d'entrainer de nouveaux perfectionnements. En 2017, la BnF s'est engagée à « faciliter l'usage de Gallica » en imaginant de nouveaux outils de recherches performants notamment grâce à la fouille d'images²¹.

²⁰ BENSAMOUN (Alexandra), FARCHY (Joëlle), « Mission intelligence artificielle et culture : rapport final», Ministère de la Culture, Conseil supérieur de la propriété littéraire et artistique, 27 janvier 2021, URL : <https://www.enssib.fr/bibliotheque-numerique/notices/69406-mission-intelligence-artificielle-et-culture-rapport-final>. Consulté le 3 août 2024.

²¹ « GallicaPix, un nouvel outil d'exploration iconographique | Le blog de Gallica », [s.d.]. URL : <https://gallica.bnf.fr/blog/21062021/gallicapix-un-nouvel-outil-dexploration-iconographique?mode=desktop>. Consulté le 3 août 2024.

La bibliothèque a donc demandé une étude à Valconum, un consortium académique-industriel visant la valorisation de contenus numériques. Elle souhaitait obtenir un panorama des solutions techniques afin de mettre en place des outils de recherche d’images dans Gallica. Ces derniers devaient reposer, non seulement sur les métadonnées textuelles associées aux images, mais aussi sur la reconnaissance automatique des caractéristiques de ces images²².

Avec l’avènement de l’apprentissage profond, une application concrète de cette approche réside dans la recherche d’images par similarité, grâce à la faculté d’extraire des caractéristiques des images, de manière automatique²³.

Une autre méthode consiste à classer les images en fonction de leur contenu sémantique en identifiant automatiquement des « concepts » pour former un index. Grâce à l’annotation automatique d’une image ou d’une partie de l’image, ces annotations peuvent ensuite être intégrées dans une ontologie permettant de créer des liens entre les termes. L’indexation par le contenu sémantique peut être utilisée pour identifier et localiser des éléments dans une image, ou pour générer automatiquement des légendes d’illustration (comme le projet de la BAV)²⁴.

GallicaPix est un prototype de recherche iconographique qui vise à compenser la trop grande masse de documents disponibles en ligne. L’outil arrive à identifier les différents types d’illustrations en fonction de leur nature ou de leur fonction, ainsi qu’à reconnaître les caractères et la structure des documents. En plus de leurs métadonnées, les documents sont annotés d’informations supplémentaires sur leurs compositions visuelles et textuelles. Et il est ainsi possible d’effectuer une recherche avec les éléments textuels d’une illustration en recherchant les « concepts » contenus dans l’image, le terme « concept » désignant les éléments (personnes ou objets) figurant sur l’illustration.

²² MOIRAGHI (Eleonora), « Explorer des corpus d’images. L’IA au service du patrimoine », Billet, *Carnet de la recherche à la Bibliothèque nationale de France*, 16 avril 2018. URL : <https://bnf.hypotheses.org/2809>. Consulté le 3 août 2024.

²³ Voir II/ 2) B. La recherche iconographique

²⁴ Voir II/1) A. Appliquer l’IA aux manuscrits : protocole et fonctionnement



Figure 3, Capture d'écran, Corpus de Zoologie, projet GallicaPix.

Fig. 3, Capture d'écran, Corpus de Zoologie, projet GallicaPix. Source : Blog de Gallica, en ligne : <https://gallica.bnf.fr/blog/21062021/gallicapix-un-nouvel-outil-dexploration>. Consulté le 3 août 2024.

La réalisation du projet s'est effectuée en différentes étapes²⁵ sur un modèle similaire à celui du projet de la BAV :

- Prétraitement des images pour en améliorer la qualité
- Les images ont été extraites des serveurs Gallica via l'API Image IIIF.
- Extraction des caractéristiques structurelles des images (sachant que les métadonnées étaient souvent lacunaires et sans vocabulaire normé)
- Constitution d'une base de données où sont stockées les caractéristiques des images en format XML, qui ont été enrichies dans un deuxième temps avec un réseau de neurones convolutifs nommé « Inception-V3 ». Il a été réentraîné sur un jeu de 12 classes documentaires (avec environ 1000 images par classe) pour la classification des genres d'illustrations (photo, gravure, carte, etc.).
- Comparaison aux caractéristiques d'une image spécifique lors d'une requête de l'usager²⁶.

L'utilisation d'un réseau de neurones convolutifs a entraîné des conséquences représentatives de ses limites que nous évoquerons en deuxième partie. En effet, le nombre d'erreurs augmente sur des genres visuellement proches.

²⁵ Voir II/1) A. Appliquer l'IA aux manuscrits : protocole et fonctionnement

²⁶ MOIRAGHI (Eleonora), « Explorer des corpus d'images. L'IA au service du patrimoine », Billet, *Carnet de la recherche à la Bibliothèque nationale de France*, 16 avril 2018. URL : <https://bnf.hypotheses.org/2809>. Consulté le 3 août 2024.

Il est pour l'instant possible de naviguer dans cinq corpus différents de documents qui ont chacun leurs propres particularités. Le cinquième corpus a attiré notre attention par sa thématique : la zoologie²⁷ (Fig. 3). Les similitudes et les différences de ce projet avec celui de la BAV sont détaillées en troisième partie.

Un autre outil de la BnF qui a retenu notre attention se nomme « GallicaSnoop »²⁸. C'est un moteur d'indexation et de recherches d'images qui repose sur un réseau de neurones convolutifs qui permet de chercher et de retrouver des similarités visuelles dans les images. Les agents de la BnF l'utilisent comme support de médiation, ce qui ouvre des pistes d'usages intéressants. La sophistication des techniques d'intelligence artificielle dans le domaine du traitement d'image permet leur intégration dans les outils des bibliothèques numériques.

Elle permet d'explorer de nouvelles opportunités, comme la création de jeux de données iconographiques pour la recherche ou l'entraînement d'un réseau de neurones.

Il est désormais également possible de diffuser les fonds iconographiques ainsi indexés selon des protocoles standards (comme le standard IIIF).

Cependant, des défis découlent aussi de ces progrès techniques : ces technologies sont plutôt appliquées et entraînées par des sociétés privées sur des ressources contemporaines et non sur des fonds patrimoniaux hétérogènes. Elles sont coûteuses et demandent un stockage conséquent de métadonnées, ces dernières nourrissant leurs propres problématiques d'uniformisation de format et de vocabulaire pour avoir une indexation pérenne.

D'autres projets ont retenu notre attention et nous ont permis d'analyser les questionnements qui se sont posés tout au long du projet de la BAV.

Le projet Anr Numapress vise à travailler sur la reconnaissance automatisée des images de presse d'entre-deux-guerres²⁹. L'indexation sémantique automatique issue des illustrations de cette presse n'était pas parfaite, mais les catégories dégagées par l'indexation pour certains corpus spécifiques comme « le sport dans la presse quotidienne » faisaient sens les unes par rapport aux autres. Le contenu de ces images influence donc considérablement le bon fonctionnement de l'IA et la pertinence de son utilisation.

Le projet Siamese quant à lui, est né de l'idée que l'analyse des images publicitaires permettait de mettre en évidence les idéaux, les modes et les aspirations d'une société à une époque spécifique.

Or, les réseaux de neurones ne fournissaient pas de résultats pertinents avec les images publicitaires du XX^e siècle. Il a donc été décidé de ne pas utiliser la dernière couche de classification du réseau (celle qui a servi dans le projet de la Vaticane à déterminer qu'un chat était bien un chat). Au lieu de cela, les ingénieurs ont opté pour la solution d'arrêter l'algorithme à l'avant-dernière couche de calcul qui détecte les caractéristiques structurelles et formelles d'une image, comme la présence de lignes, de cercles ou de triangles.

²⁷ Mandragore : jeu d'images annotées sur le thème de la zoologie | Api », [s.d.], URL : <https://api.bnf.fr/fr/mandragore-jeu-dimages-annotees-sur-le-theme-de-la-zoologie>. Consulté le 31 août 2024.

²⁸ « Quelques projets d'intelligence artificielle en cours à la BnF », *BnF - Site institutionnel*, [s.d.]. URL : <https://www.bnf.fr/fr/quelques-projets-dintelligence-artificielle-en-cours-la-bnf>. Consulté le 3 août 2024.

²⁹ MOIRAGHI (Eleonora), *op. cit.*

Les images ont donc été classifiées en étant regroupées selon leurs caractéristiques structurelles et visuelles. Ce processus a abouti à l'application finale du projet³⁰ qui fournit à partir de la sélection d'une image, les images publicitaires similaires par année tout en consultant le journal correspondant.

Pour le projet de la BAV, les développeurs sont allés au bout de la dernière couche de calcul de l'algorithme pour attribuer les annotations automatiques IIIF qui étaient primordiales dans leur projet. Pour autant, il aurait également pu être intéressant d'utiliser la technique du projet Siamese pour comparer la réussite des résultats.

La compétition *Classification of Latin Medieval Manuscripts* (CLAMM) cherchait à reconnaître des écritures de manuscrits médiévaux (classées en douze classes) et à en établir la datation. Les membres de l'Institut de recherche et d'histoire des textes (IRHT) ont annoté la base de données sur laquelle s'est fondée la compétition, base de données qui a été organisée en sous-ensembles et divisée en deux (une partie pour l'apprentissage de l'IA et une partie pour les tests). La moitié des systèmes reposait sur des réseaux neuronaux convolutifs et des architectures profondes, tandis que les autres utilisaient plus ou moins de caractéristiques. Ce sont les réseaux neuronaux qui ont donné les meilleurs résultats. La reconnaissance des différentes classes d'écritures a mieux fonctionné que celle de la datation car le corpus de l'apprentissage était moins régulier en nombre d'éléments par classes.

Pour pallier le manque de régularité de ces tâches de classification, une hypothèse serait de faire apprendre au système, par interaction avec le codage de l'ingénieur, les poids des différentes caractéristiques, ce qui permettrait potentiellement d'améliorer le système au fur et à mesure de son utilisation.

Pour le projet de la BAV, le problème du manque de données pour l'entraînement a été très vite soulevé. Certains animaux sont présents dans le manuscrit plusieurs centaines de fois (les oiseaux notamment dans les traités de fauconnerie) alors qu'il n'y a qu'une unique représentation dans les manuscrits de la Vaticane, d'une salamandre des cavernes d'Ambrosi. Ce manque d'homogénéité du corpus de données a considérablement influencé les résultats³¹.

À l'échelle internationale également, des projets de recherche d'images sont en cours de développement. Le projet *Saint George on a Bike* (SGoB) a pour objectif d'améliorer la qualité et la quantité des métadonnées liées aux images du patrimoine culturel européen. La formation de modèles d'apprentissage profond pour la détection d'objets et la reconnaissance d'images est programmée par le *Barcelona Supercomputing Center*. Le but consiste à classer automatiquement les œuvres d'art et à créer des légendes (ou enrichir les existantes) sur les images des collections de la plateforme numérique *Europeana* (qui regroupe les collections numérisées d'environ 4000 institutions européennes)³².

Afin d'atteindre cet objectif, SGoB doit relever deux défis : d'une part, rendre accessible aux réseaux neuronaux des informations sur les symboliques, l'iconographie et la culture des pays au cours des époques, et d'autre part, élaborer des méthodes d'apprentissage automatique axées

³⁰ « SIAMESE | KB LAB », National Library of the Netherlands, [s.d.]. URL : <https://lab.kb.nl/tool/siamese>. Consulté le 31 août 2024

³¹ Voir II/ 1) A. Appliquer l'IA aux manuscrits : protocole et fonctionnement

³² « Saint George on a Bike : Quand l'Intelligence Artificielle améliore la compréhension des œuvres d'art », ActuIA, [s.d.]. URL : <https://www.actuia.com/actualite/saint-george-on-a-bike-quand-lintelligence-artificielle-ameliore-la-comprehension-des-oeuvres-dart/>. Consulté le 31 août 2024.

sur la reconnaissance de l'image, capables de déchiffrer le langage pictural qui caractérise les symboles iconographiques³³.

La formation des modèles de détection d'objets et de reconnaissance d'images par SGoA B a été basée sur l'apprentissage profond, en utilisant à la fois la détection d'objets et l'analyse de la sémantique picturale des images. Dans un premier temps, les chercheurs ont établi des catégories d'objets pertinents pour l'iconographie. Ensuite, ils ont divisé les images en segments et ont entraîné les réseaux neuronaux en utilisant des bases de données (*DBpedia*, *Wikidata*, *Wikimedia Commons*) pour apposer des légendes sur les images.

Chaque image numérisée ainsi accompagnée d'une description devrait permettre à tous les utilisateurs, y compris aux personnes malvoyantes, de mieux comprendre la nature et la pertinence d'un site Web dédié au patrimoine culturel. Maria-Cristina Marinescu, coordinatrice du projet, a déclaré : « Notre projet permettra d'accéder rapidement à une information culturelle enrichie, qui pourra servir aussi bien à des fins culturelles et sociales, d'éducation, de tourisme, et éventuellement d'historiens ou d'anthropologues. Indirectement, les citoyens peuvent bénéficier de meilleurs services publics, lorsque ceux-ci sont basés sur l'idée que les métadonnées les plus riches que nous produisons offrent – tels que l'accessibilité du Web pour les malvoyants....»³⁴.

Si nous devions résumer les enjeux des projets d'application d'intelligence artificielle aux collections d'images numérisées, nous pourrions dire qu'entre 2011, où les professionnels du monde des bibliothèques constataient que l'indexation de l'image passait par le texte³⁵, et aujourd'hui, l'amélioration des techniques d'intelligence artificielle a changé la donne. Certes, l'image a encore besoin du texte pour produire des annotations et lier les métadonnées aux numérisations. Pour autant, de nos jours, se développent de plus en plus d'outils visuels pour rechercher dans les fonds numériques.

Cela signifie que les institutions doivent s'adapter à de nouveaux éléments et la BAV n'y a pas fait exception pour son projet : le problème d'anachronisme avec l'utilisation d'images contemporaines pour la reconnaissance d'images anciennes est une limite. L'entraînement des algorithmes est fondamental tout comme posséder des données propres et pertinentes comme terrain d'entraînement pour obtenir des résultats performants. Enfin, ces derniers doivent être normés pour offrir comme résultat une ontologie rigoureuse scientifiquement, facilement compréhensible pour les chercheurs et pérenne³⁶.

La troisième conférence internationale sur l'intelligence artificielle appliquée aux bibliothèques, archives et musées, « Fantastiques futurs », a eu lieu en 2021 à la BnF et s'est concentrée en grande partie sur ces enjeux : l'éthique, le standard IIIF, la formation, les interfaces et surtout les données³⁷.

³³ <https://saintgeorgeonabike.eu/about-objectives>

³⁴ *Ibid.*

³⁵ MOIRAGHI (Eleonora), *op. cit.*

³⁶ Voir III/1) B. Interopérabilité et standard IIIF

³⁷ LECLAIRE (Céline), « Les futurs Fantastiques », 3 février 2022. URL : https://bbf.enssib.fr/tour-d-horizon/les-futurs-fantastiques_70324. Consulté le 31 août 2024.

Marion Carré, lors de sa conférence introductory au congrès, a souligné le rôle important des professionnels du patrimoine pour révolutionner l'IA parce que les institutions culturelles présentent un grand nombre de données structurées et s'adressent à des publics souvent larges, ce qui en font un champ d'expérimentation idéal. Elle a ainsi achevé sa conférence en expliquant que l'art « peut être une sorte de bac à sable éthique où nous pouvons percevoir les effets indésirables avant qu'il ne soit trop tard »³⁸. Comme le résume André Gunthert, les différentes applications des méthodes d'analyse automatique d'images démontre « la nécessité et la fécondité de la collaboration étroite entre les humanistes et les ingénieurs pour répondre de manière qualitative à la multiplication des questions scientifiques que la mise à disposition de corpus massifs et de nouveaux outils de recherche d'images provoque »³⁹. Nous allons voir combien cette collaboration est nécessaire et précieuse pour la bonne marche d'un projet impliquant l'intelligence artificielle et l'histoire de l'art.

2) La situation à la Bibliothèque apostolique vaticane

A. Les projets numériques de la Bibliothèque apostolique vaticane (BAV) avant 2023

Le projet « Proof of Concept » (2015)

L'équipe du service de coordination informatique de la Bibliothèque apostolique travaille depuis des années sur la valorisation de ses collections par le biais d'outils numériques. Le projet maniant l'intelligence artificielle dont rend compte ce mémoire trouve donc ses racines bien avant 2023.

En 2015, à la suite d'un projet de numérisation d'envergure, 80 000 manuscrits médiévaux de la Vaticane, numérisés, sont mis en ligne sur le site de la bibliothèque mais ils sont pour la plupart mal ou non catalogués, rendant leur consultation impossible. La BAV cherche donc un nouveau moyen d'inviter les usagers à découvrir ces collections en ligne⁴⁰. Est alors lancée, sous l'impulsion de Paola Manoni, responsable du service de coordination informatique, l'expérimentation d'un projet intitulé « Proof of concept ». Ce dernier a pour objectif de présenter les manuscrits numérisés, reproduits en haute définition d'une part, mais aussi reliés à leurs métadonnées, c'est-à-dire à tous les éléments présents dans la base les concernant, notice de présentation, lieu de conservation, cote, contexte historique.... La bibliothèque voulait ainsi permettre une consultation plus accessible et complète de ses fonds aux chercheurs. Elle

³⁸ CARRÉ (Marion), « Conférence introductory, Que peut l'art pour l'intelligence artificielle ? » *Fantastiques futurs*, Paris, Bibliothèque nationale de France, jeudi 9 décembre 2021, URL : <https://www.inoreader.com/search/feeds>. Consulté le 2 septembre 2024.

³⁹ MOIRAGHI (Eleonora), *op. cit.*

⁴⁰ Stanford University Libraries Digital Library Systems & Services, SpotlightServiceCommunityCall demo 8Nov2019, 2019, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Zt0wQsGMPjc&t=1s>. Consulté le 02 septembre 2024.

souhaitait également que ces numérisations de manuscrits puissent être utilisées, annotées, commentées, transcrrites.

Pour mener à bien ce projet, l'adoption du standard IIIF (International Image Interoperability Framework) a été une étape clef. Comme nous l'avons vu précédemment, IIIF permet de standardiser la visualisation et l'interopérabilité d'images numériques, facilitant ainsi leur consultation et leur utilisation par les chercheurs. Dix manuscrits de la Vaticane ont été soigneusement sélectionnés pour cette phase pilote, en tenant compte de leur valeur historique et de leur état de conservation. Avant la numérisation, chaque manuscrit a fait l'objet d'une préparation minutieuse, incluant des mesures de conservation préventive pour assurer sa préservation durant le processus⁴¹.

Le projet « Proof of concept » a donné naissance à la plateforme DIGIVATLIB⁴² (DVL) en 2016⁴³. Elle a utilisé le standard IIIF et le manifeste⁴⁴ lié à ce standard contenant toutes les informations disponibles concernant les images et les données de chacun des dix manuscrits. Cette plateforme offre une interface interactive pour explorer, comparer, annoter les manuscrits numérisés. Ainsi, ces collections numérisées sont entrées sur le web de données⁴⁵, devenant plus accessibles aux chercheurs avec un éventail d'outils intégrés pour leurs analyses : visualisation simultanée de plusieurs ouvrages, agrandissements, ajustements...

Les premiers résultats du projet ont été très positifs. La visibilité des manuscrits numérisés s'est accrue à l'échelle internationale, et la plateforme DVL a reçu des retours positifs de la part des chercheurs et des utilisateurs. Ce succès initial a démontré l'intérêt de l'utilisation des différents outils numériques en jeu et a ouvert la voie à un projet de recherche de trois ans (2016-2019) : le « Projet Mellon » intitulé « Thematic Pathways on the Web : IIIF annotations of manuscripts from the Vatican collections. »

Le projet « Mellon » en collaboration avec Stanford (2016-2019)

En 2016, la BAV a donc reçu une subvention de la fondation Andrew W. Mellon⁴⁶ pour un projet triennal de numérisation en partenariat avec les bibliothèques de l'université de Stanford. Ce projet visait à développer une plateforme technologique avancée pour la gestion et l'accès aux manuscrits numérisés.

⁴¹ MANONI (Paola) et PONZI (Eva) « Thematic Pathways on the Web: IIIF annotations of manuscripts from the Vatican collections: il “Progetto Mellon” della Biblioteca Vaticana. La storia della miniatura incontra lo Spotlight », *Rivista di storia della miniatura* 24, 2020, p. 211-216.

⁴² « DigiVatLib-Vatican Library », [s.d.]. URL : <https://digi.vatlib.it/>. Consulté le 2 septembre 2024.

⁴³ MANONI (Paola) et PONZI (Eva), *op cit.*

⁴⁴ Voir III/1) B. Interopérabilité et standard IIIF

⁴⁵ MANONI (Paola), « L'adozione del IIIF nell'ecosistema digitale della Biblioteca Apostolica Vaticana », *DigItalia*, vol. 15, no 2, (décembre 2020), p. 96-105. URL : <https://digitalia.cultura.gov.it/article/view/2632>. Consulté le 2 septembre 2024.

⁴⁶ La fondation américaine Andrew W. Mellon, fondée en 1969, est basée à New York et dotée de la richesse accumulée par Andrew Mellon, banquier philanthrope et collectionneur d'art américain. La fondation a subventionné de nombreuses initiatives entreprises à l'échelle internationale pour la promotion de l'IIIF, en particulier le développement de la technologie pour l'étude des collections de livres rares et de manuscrits.

Face au nombre considérable de manuscrits numérisés (qui continue de croître à l'heure actuelle), il fallait trouver des outils capables de rendre disponible et accessible une telle masse de données. De plus, toutes les conservatrices et conservateurs de la bibliothèque voulaient profiter de cette opportunité pour partager en ligne l'histoire de leurs collections. Le projet s'est alors concentré sur environ 300 des 80 000 manuscrits numérisés. Les chercheurs des bibliothèques de Stanford ont travaillé sur la construction de l'architecture d'une plateforme en ligne capable de combiner des parcours thématiques, la technologie IIIF et des métadonnées en langage TEI. Cette plateforme a vu le jour avec le logiciel Spotlight, un logiciel open source, utilisé pour présenter les métadonnées et les contenus d'annotation des manuscrits sélectionnés, avec des expositions virtuelles thématiques⁴⁷.

Sur la plateforme, les contenus sont divisés en itinéraires thématiques (expositions virtuelles) et chaque itinéraire offre trois niveaux d'information différents :

- 1) Une description générale (introduction, informations historiques, *etc.*) du thème choisi. Ce texte, enrichi de nombreux éléments visuels, est fourni en anglais et en italien ;
- 2) Les métadonnées descriptives et de contenu, accompagnées des notes des conservateurs qui illustrent chaque manuscrit sélectionné ;
- 3) Les annotations, commentaires et analyses approfondies des parties détaillées d'un manuscrit et la transcription de folios⁴⁸.

Cette approche permet une exploration approfondie des collections et enrichit l'expérience des utilisateurs.

Le processus de numérisation a suivi une méthodologie rigoureuse pour assurer la qualité et la fidélité des reproductions numériques. Pour rajouter sur ces numérisations des annotations, le logiciel Mirador a été utilisé. Ce logiciel est l'un des outils les plus importants mis en œuvre au sein de la communauté IIIF. Il s'agit d'une visionneuse d'images configurable, extensible et facile à intégrer dans d'autres applications informatiques. Elle présente la possibilité de comparer deux images ou plus de bibliothèques numériques compatibles avec le protocole d'interopérabilité. Elle permet également d'insérer des annotations sur les images, et offre ainsi la possibilité de les rechercher et de les classer par annotations⁴⁹.

Pour commencer, nous avons chargé les images numérisées des 300 manuscrits sur Mirador. Puis les conservateurs et chercheurs du projet ont annoté en ligne sur le logiciel, image par image, ce qu'ils désiraient souligner dans chaque ouvrage. Ils annotaient le texte mais aussi les illustrations en utilisant des étiquettes (*tags* en anglais) basées sur un vocabulaire standardisé⁵⁰ sur le modèle suivant : type d'annotations, l'annotation elle-même et le nom de la personne qui annotait (par exemple « Tag « Animals », « Dog », « C. Ferrari »). La création de ces annotations se faisait directement sur Mirador mais elles étaient stockées et accessibles sur la

⁴⁷ MANONI (Paola) et PONZI (Eva), *op cit.*

⁴⁸ *Ibid.*

⁴⁹ MANONI (Paola), « L'adozione del IIIF nell'ecosistema digitale della Biblioteca Apostolica Vaticana », *DigItalia*, vol. 15, no 2, (décembre 2020), p. 96-105. URL : <https://digitalia.cultura.gov.it/article/view/2632>. Consulté le 2 septembre 2024.

⁵⁰ Nous reviendrons sur les questions d'ontologie et de vocabulaire standardisé dans notre troisième partie.

plateforme Spotlight (qui héberge aujourd’hui le résultat du projet) presque immédiatement après leur création par mesure de sécurité.

Le logiciel Mirador a subi une série d’ajustements et de transformations requis par l’équipe de la BAV pour leur projet, ce qui a permis son amélioration. Toutes les annotations dont le périmètre est turquoise indiquent des transcriptions, tandis que la couleur blanche indique des annotations d’éléments iconographiques (Fig. 4). Le contour des annotations a été formaté ainsi que leur direction, avec par exemple des annotations bidirectionnelles de droite à gauche ou de gauche à droite.

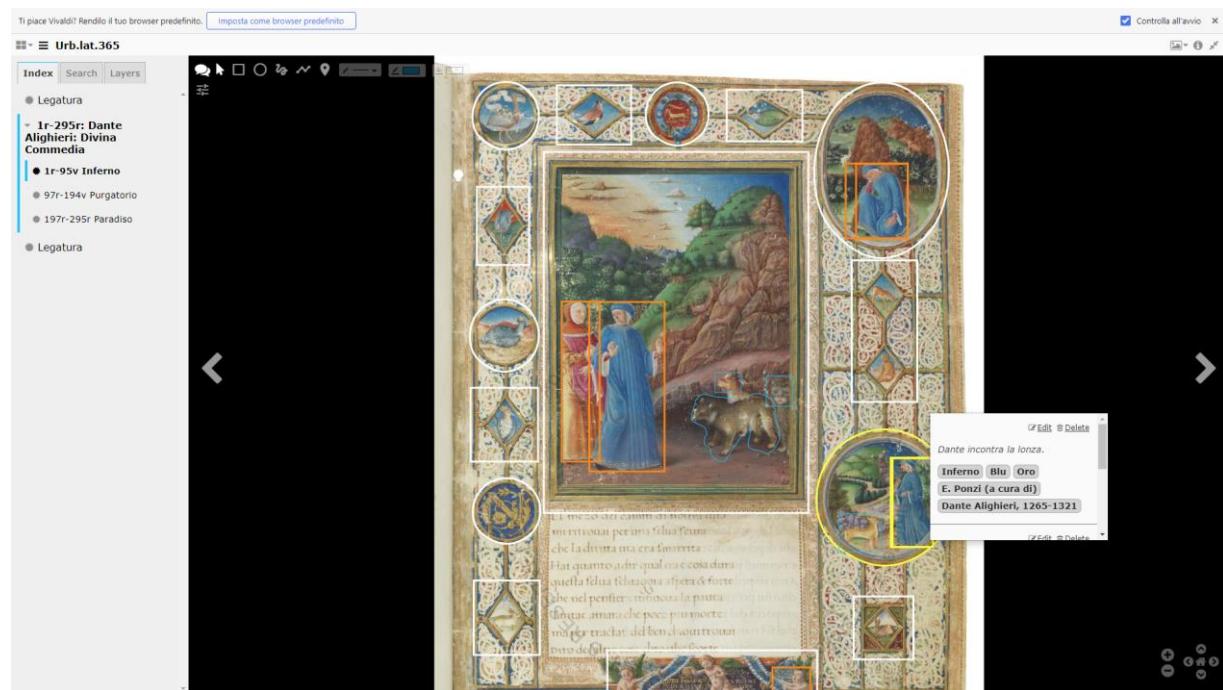


Fig. 4, Urb. Lat. 365, Dante Alighieri, Divina Commedia, Folio 1 recto. Source: Spotlight, en ligne https://spotlight.vatlib.it/dante/catalog/Urb_lat_365. Consulté le 1er septembre 2024.

L’exploration des annotations et des métadonnées est gérée dans le logiciel Spotlight susmentionné au moyen d’un dispositif d’indexation et d’une structure de filtrage (filtre avec entre autres critères, la provenance, la date, la langue, les noms apparaissant dans les descriptions), afin de permettre des recherches plus approfondies. Cette structure répertorie également les étiquettes (des « tags », en italien et en anglais) par lesquelles les annotations ont été classées (Fig. 5). L’indexation de sujets iconographiques identifiés par exemple, permet de retrouver immédiatement les folios des manuscrits dans lesquels ces éléments catégorisés et indexés apparaissent, associés à leurs annotations⁵¹.

⁵¹ Stanford University Libraries Digital Library Systems & Services, SpotlightServiceCommunityCall demo 8Nov2019, 2019, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Zt0wQsGMPjc&t=1s>. Consulté le 02 septembre 2024.

Annotation tags	Collection
► A. Berloco 1 • Accidiosi 1 ► Acheronte 2 • Adam 1 • Adulatori 1 • Agnolo Brunelleschi 1 • Agostino da Assisi 1 • Albertus Magnus, s., 1193-1280 1 • Alchimisti 1 • Alloro 3 • Amore 1 • Anastasio II, papa 1 • Angeli 13 • Angeli musicanti 1 • Angelo guardiano 1 ► Animali 34 • Anime purganti 1 • Anselmus, s., 1033-1109 1 • Antenóra 1 • Anteo 2 • Antiporto miniate 1 • Antipurgatorio 2 • Aquila 10 • Arancio 17 • Arpie 2 • Avari 1 • Azzurro 2 • Barattieri 1 • Bastoni bolognesi 3 • Beatrice 39 • Beda Venerabilis, s., 673-735 2 • Belaqua 1 • Bernardus, s., abate di Clairvaux, 1020-1050	Urb.lat. 5 Barb.lat. 4 Chig. 3 Vat.lat. 3 Reg.lat. 2 Ott.lat. 1
Date	
sec. xiv med.	7
sec. xv ex.	4
sec. xv in.	3
sec. xiv med	2
<sec. xiv med.>	1
<sec. xiv>	1
sec. xiii	1
sec. xiii ex.	1
sec. xiii-xiv	1
altri »	

Fig. 5, Tags de l'exposition virtuelle *Viaggiare con Dante*. Source : Spotlight, en ligne : <https://spotlight.vatlib.it/dante>. Consulté le 1er septembre 2024.

L'objectif de cette recherche de trois ans, outre la mise en place complexe de la plateforme, était la publication d'un premier noyau d'expositions virtuelles thématiques. Elles étaient au nombre de quatre :

- L'exposition virtuelle « Cours de paléographie : Paléographie latine (de l'Antiquité à la Renaissance) », éditée par A. M. Piazzoni, et « Paléographie grecque (de l'Antiquité à la Renaissance) », éditée par T. Janz ;

Il s'agit de deux parcours qui dérivent de la sélection de deux sections distinctes de manuscrits, mais qui ont tous deux le même objectif : expérimenter une nouvelle méthode d'enseignement de la paléographie en remplaçant le traditionnel répertoire iconographique papier, avec lequel l'évolution des écritures est démontrée, par la visualisation "dynamique" de manuscrits numérisés et annotés à travers Mirador. Dans ces deux voies, il y a, bien sûr, une part considérable de transcription de folios spécifiques⁵².

Pour l'onglet des manuscrits grecs, le conservateur Timothy Janz avait pour objectif de créer le premier livre de texte de paléographie grecque en anglais depuis trente ans, mais en utilisant des ressources électroniques. Grâce à une double-fenêtre Mirador avec deux manuscrits côte-

⁵² MANONI (Paola), « L'adozione del IIIF nell'ecosistema digitale della Biblioteca Apostolica Vaticana », *DigItalia*, vol. 15, no 2, (décembre 2020), p. 96-105. URL : <https://digitalia.cultura.gov.it/article/view/2632>. Consulté le 2 septembre 2024.

à-côte, l'utilisateur peut tourner les pages des deux fenêtres simultanément ou non, pour comparer les écritures des manuscrits.⁵³

L'utilisation du standard IIIF est un soutien à l'auto-apprentissage pour la lecture et la compréhension des écritures anciennes dans les alphabets latin et grec.

- « Classici Latini (Évolution et transmission des œuvres classiques) », éditée par M. Buonocore ;

Le parcours entend montrer les classiques latins en proposant une sorte d'échantillonnage des manuscrits « illustrés » les plus importants du Vatican, porteurs de textes latins classiques, afin de permettre « un dialogue constructif et de riches comparaisons avec d'autres témoins de la culture européenne entre l'Antiquité tardive, le Moyen Âge et l'Humanisme »⁵⁴.

Pour ce parcours, les annotations sous forme d'étiquettes ont été précieuses. Les *tags* indexés dans le Spotlight sont utilisés pour naviguer entre les miniatures annotées des manuscrits d'intérêt. En cliquant sur les tags, une liste déroule directement le numéro de la page et les informations sur le manuscrit. Un lien amène également à la numérisation entière de l'ouvrage. La fonction « browse », « parcourir » en français, permet de chercher dans les manuscrits catégorisés par thématiques (Fig. 6)⁵⁵.

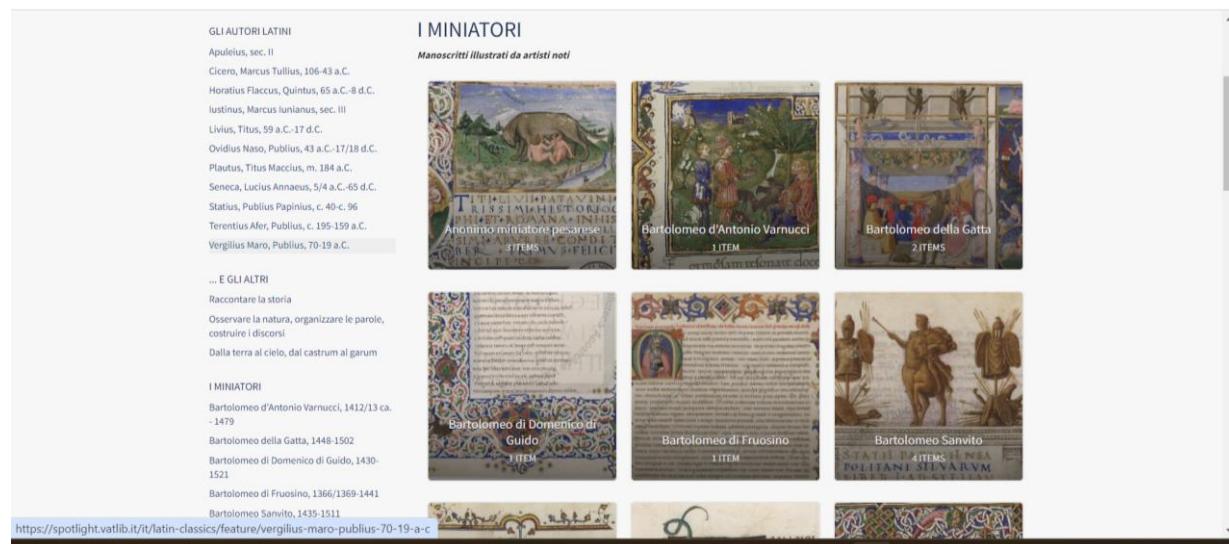


Fig. 6, Sous-partie de l'exposition *Classici Latini, Evoluzione e trasmissione di opere classiche*. Source : Site Spotlight, en ligne : <https://spotlight.vatlib.it/dante>. Consulté le 1er septembre 2024.

⁵³ Stanford University Libraries Digital Library Systems & Services, SpotlightServiceCommunityCall demo 8Nov2019, 2019, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Zt0wQsGMPjc&t=1s>. Consulté le 02 septembre 2024.

⁵⁴ MANONI (Paola), *op cit.*

⁵⁵ Stanford University Libraries Digital Library Systems & Services, *op cit.*

Fig. 6, Sous-partie de l'exposition Classici Latini, Evoluzione e trasmissione di opere classiche. Source : Site Spotlight, en ligne : <https://spotlight.vatlib.it/dante>. Consulté le 1er septembre 2024.

- « Vatican Palimpsests (Digital Recovery of Deleted Identities) » éditée par A. Nemeth ;

La Bibliothèque du Vatican a identifié dans ses collections plus de 550 manuscrits avec des palimpsestes, c'est-à-dire des feuilles de parchemin qui ont été réutilisées plusieurs fois en effaçant les écritures plus anciennes. Cette exposition se concentre sur la sélection de 24 manuscrits et propose une recherche approfondie afin de retrouver les écritures effacées de ces palimpsestes. Les codices sélectionnés couvrent l'histoire de l'écriture latine et grecque à partir des IV^e et V^e siècles et englobent un large éventail de genres littéraires et de sphères culturelles antérieurs au XII^e siècle, principalement liés au monde byzantin⁵⁶.

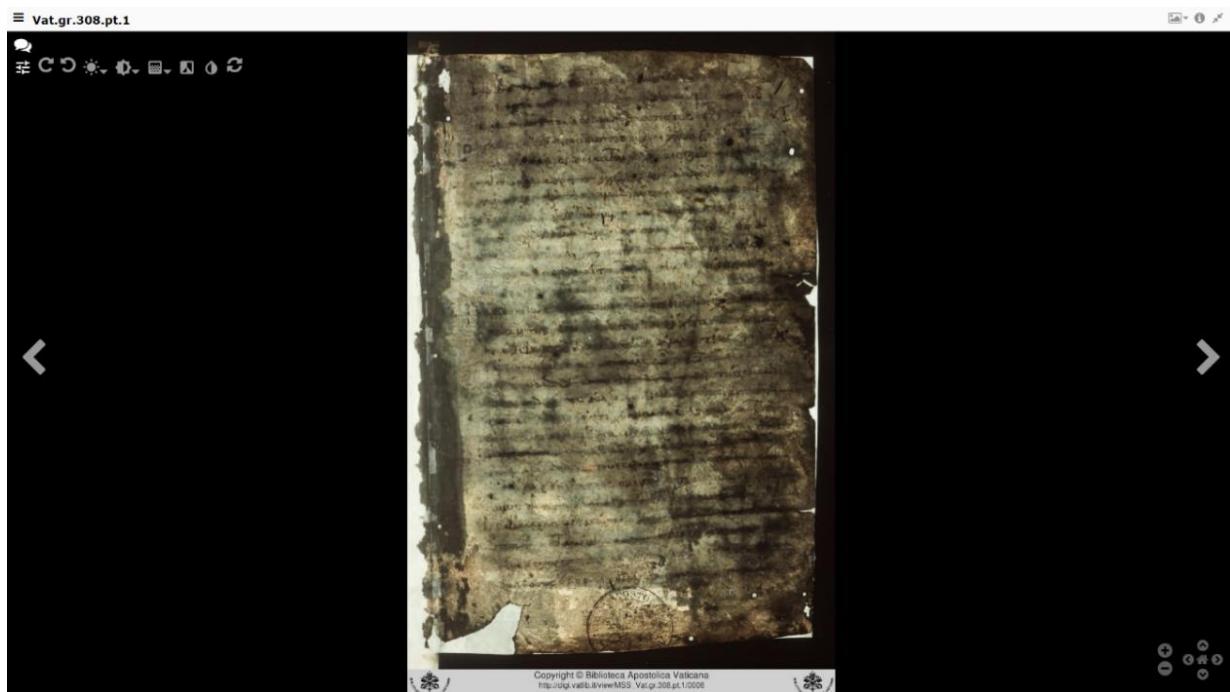


Fig. 7, Vat. Gr. 308 pt 1, Folio Ir.[02.wl.0000], Source: Spotlight, en ligne : https://spotlight.vatlib.it/palimpsests/catalog/Vat_gr_308_pt_1. Consulté le 1er septembre 2024.

⁵⁶ MANONI (Paola), *op cit.*

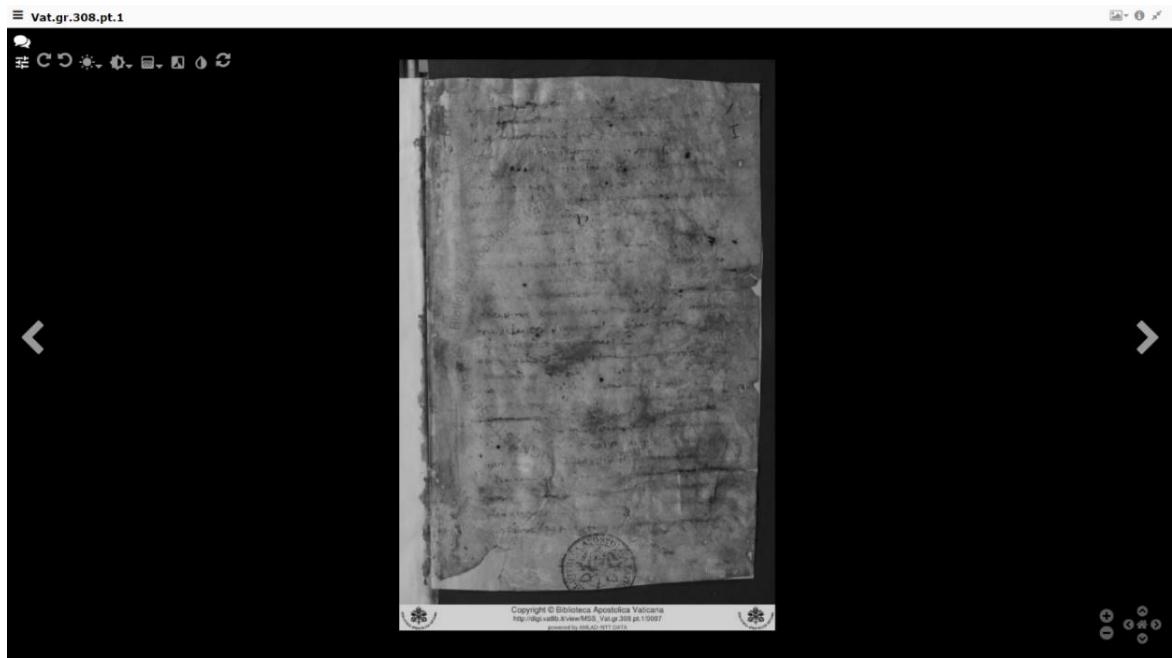


Fig. 8, Folio Ir.[03.wl.0000], Source: Spotlight, en ligne : https://spotlight.vatlib.it/palimpsests/catalog/Vat_gr_308_pt_1. Consulté le 1er septembre 2024.

Mirador a été utilisé pour exposer ce que parvenaient à révéler l'imagerie multispectrale et la lumière violette des couches de textes antérieurs (Fig. 7 et 8)⁵⁷.

- La bibliothèque d'un noble humaniste (Federico da Montefeltro et ses manuscrits), éditée par M. G. Critelli.

À travers la description d'une sélection de manuscrits, l'exposition virtuelle vise à illustrer les principales caractéristiques de la bibliothèque renaissance de Federico Montefeltro, un exemple admirable d'une bibliothèque nobiliaire à Urbino au XV^e siècle⁵⁸. Encore une fois, la plateforme Spotlight et l'utilisation de IIIF ont permis aux conservateurs de mettre en avant les manuscrits qui leurs semblaient pertinents, et d'insister sur certaines catégories d'exploration comme l'héraldique ou les reliures remarquables de la collection⁵⁹. Enfin, l'exposition permet d'effectuer des recherches croisées pour tous les manuscrits : métadonnées, notes des conservateurs et annotations dans les différents parcours.

⁵⁷ Stanford University Libraries Digital Library Systems & Services, SpotlightServiceCommunityCall demo 8Nov2019, 2019, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Zt0wQsGMPjc&t=1s>. Consulté le 02 septembre 2024.

⁵⁸ MANONI (Paola), « L'adozione del IIIF nell'ecosistema digitale della Biblioteca Apostolica Vaticana », *DigItalia*, vol. 15, no 2, (décembre 2020), p. 96-105. URL : <https://digitalia.cultura.gov.it/article/view/2632>. Consulté le 2 septembre 2024.

⁵⁹ Stanford University Libraries Digital Library Systems & Services, *op cit.*

Au cours des trois années de travail, un total de 26 233 annotations a été produit pour 256 manuscrits sélectionnés : un nombre remarquable de données qui place ce projet à la pointe des expériences sur la gestion des annotations selon la norme IIIF⁶⁰.

Résultats et perspectives :

Les projets « Proof of Concept » et « Mellon » ont représenté des avancées significatives pour la Bibliothèque apostolique vaticane dans le domaine de la numérisation et de la valorisation de ses collections. L'adoption du standard IIIF et le développement de la plateforme Spotlight témoignent de l'engagement de la BAV à utiliser les technologies modernes pour répondre aux défis de la conservation numérique. Ces initiatives ont permis d'améliorer l'accès aux manuscrits pour les chercheurs du monde entier, tout en assurant leur préservation pour les générations futures.

La communauté scientifique s'est réjouie des résultats obtenus et le nombre croissant de visiteurs de la plateforme démontre un vif intérêt pour le programme. Pour la suite de ce projet, la BAV a décidé de continuer le développement de son site dans différentes directions :

- Elle voulait notamment étudier la possibilité de filtrer et de hiérarchiser les annotations de manière un peu plus nuancée ;
- Elle désirait collaborer avec d'autres institutions pour intégrer, dans les expositions virtuelles de Spotlight, des collections numériques autres que celles de la Vaticane puisque les parallèles entre ses manuscrits et ceux du reste du monde ne manquent pas. Elle voulait donc améliorer l'interopérabilité de ce système en récupérant avec IIIF d'autres contenus ;
- Enfin elle souhaitait intégrer de nouvelles technologies et notamment tester le procédé d'intelligence artificielle pour effectuer des recherches de reconnaissance iconographique sur les manuscrits numérisés.

C'est dans ce contexte et avec cet objectif que démarre notre stage à la bibliothèque pour expérimenter l'utilisation de l'intelligence artificielle comme nouvel outil d'exploration des collections vaticanes.

B. De l'acquisition à la numérisation des fonds de la Vaticane⁶¹

Le contexte historique de la fondation de la BAV et de l'acquisition de ses fonds est présenté ici pour délimiter les sources de notre projet. Bien que ce dernier ait été axé sur le numérique,

⁶⁰ MANONI (Paola) et PONZI (Eva) « Thematic Pathways on the Web: IIIF annotations of manuscripts from the Vatican collections: il “Progetto Mellon” della Biblioteca Vaticana. La storia della miniatura incontra lo Spotlight », *Rivista di storia della miniatura* 24, 2020, p. 211-216.

⁶¹ Pour une présentation plus approfondie des fonds, voir annexe D.

il s'avérait important de rappeler les éléments de contexte qui ont permis à la Vaticane de posséder ses ouvrages et d'avoir pour mission de les rendre accessibles⁶².

La Bibliothèque apostolique vaticane est donc la bibliothèque du Saint-Siège, la bibliothèque personnelle du pape. Y sont conservés depuis des siècles des ouvrages aux domaines variés allant de la science à l'art en passant par la spiritualité ou la littérature. C'est une bibliothèque spécialisée qui possède des critères d'admission sélectifs et n'ouvre pas aisément ses portes.

Fondées vers le milieu du XV^e siècle, les salles de consultation étaient ouvertes aux érudits qui pouvaient même emprunter les manuscrits. Aujourd'hui, bien que le prêt ait disparu, le projet de numérisation des manuscrits tend à rendre possible l'accès gratuit aux fonds partout dans le monde.

La liste des collections papales la plus ancienne (mais incomplète) est celle dressée au début du pontificat de Boniface VIII en 1295. Elle contient 443 codices . Après le départ du pape à Avignon, les collections qui étaient restées en Italie furent dispersées. Le retour du pape à Rome et le renouveau des études et de la culture firent naître une nouvelle collection de livres, attestée par un inventaire daté de la mort d'Eugène IV (1383-1447).

Le théologien et humaniste Tommaso Parentucelli da Sarzana est le concepteur et fondateur de la nouvelle bibliothèque papale, la future bibliothèque du Vatican. Sous le nom de Nicolas V (1447-1455), il est élu au trône en 1447 et crée la bibliothèque papale « pour l'usage commun des hommes de science»⁶³. Il entreprend, au cours de son pontificat, le projet d'une bibliothèque universelle humaniste et réunit environ 1300 manuscrits, dont plus de 400 en grec. Tous ces manuscrits, y compris sa propre bibliothèque, furent triés par thème, rangés dans des armoires et remis au bibliothécaire Giovanni Tortelli.

C'est le théologien franciscain Francesco della Rovere, élu sous le nom de Sixte IV (1471-1484), qui a organisé la bibliothèque papale de manière plus stable, des années plus tard, dans la continuité du projet de Nicolas V.

L'institution fut dotée d'un soutien économique constant, par la bulle *Ad decorum militantis Ecclesiae* (dans les doubles éditions de 1475 et 1477), qui assurait son fonctionnement, et Bartolomeo Sacchi (1421-1481), dit Platina, fut nommé bibliothécaire. La collection fut réorganisée par Platina, qui ouvrit et édita les registres de prêts. Il y avait environ 3500 manuscrits dans la collection en 1481, répartis dans quatre salles : la *Latina* et la *Graeca*, avec des ouvrages dans les deux langues, ouvertes au public. Les deux autres, la *Secreta* et la *Pontificia*, étaient réservées au personnel.

Elles contenaient aussi les registres pontificaux et les documents d'archives, transférés au XVII^e siècle dans la nouvelle institution des Archives secrètes du Vatican. Léon X (1513-1521), fils

⁶² Les sources principales de cette sous-partie sont les entretiens menés avec les conservateurs de la BAV, ainsi que l'ouvrage ayant pour références : PIAZZONI (Ambrogio M.), RITA (Andreina), trad. inglese di T. Janz, *Bibliotheca apostolica Vaticana*, éd Città del Vaticano, Bibliothèque apostolique vaticane, 2019.

⁶³ D'AIUTO (Francesco) et VIAN (Paolo), *Guida ai fondi manoscritti, numismatici, a stampa della Biblioteca vaticana*, Città del Vaticano, 2011 (Studi e testi, n° 466-467). ISBN : 9788821008849.

de Laurent le Magnifique, héritier de la culture florentine de la fin du XV^e siècle, réorganisa la bibliothèque.

Les ouvrages personnels de Sixte IV étaient inclus dans la section latine, ainsi que, plus tard, les plus de 200 volumes rassemblés par son neveu Jules II (1503-1513). En ce qui concerne la partie grecque, à l'initiative du pape Parentucelli, des études ont été réalisées sur les codices et des versions latines des textes transmis ont été élaborées simultanément pour faciliter leur utilisation.

Le sac de Rome n'épargne pas la bibliothèque des papes en 1527 durant lequel plusieurs reliures de valeur furent pillées. Néanmoins, en un peu plus de cinquante ans, les collections de la bibliothèque se développèrent notamment grâce à d'importantes acquisitions de manuscrits et de livres imprimés. Pie V (1566-1572) fit également venir d'Avignon un grand nombre de documents d'archives, dont 158 registres pontificaux et les volumes contenant les documents liés au schisme.

Grâce aux dons conséquents des bibliothèques personnelles des cardinaux bibliothécaires, la collection de la Vaticane continua de se développer abondement. En 1623, Grégoire XV reçut en cadeau de l'électeur de Bavière, Maximilien Ier, les livres imprimés et les manuscrits de la bibliothèque de Heidelberg, qui sont aujourd'hui conservés dans les collections Palatini.

En 1657, la collection de codices de la bibliothèque des ducs d'Urbino, créée par Federico da Montefeltro, est achetée par Alexandre VII. En 1690, la Bibliothèque vaticane reçoit les manuscrits de la bibliothèque privée que la reine Christine de Suède avait emmenés à Rome. Dans les années qui suivent, la bibliothèque du marquis Alessandro Gregorio Capponi (1746) et la collection de manuscrits et de documents d'archives de la famille Ottoboni (1748) s'ajoutèrent aux collections.

Le XVIII^e siècle est marqué par le projet de publier un catalogue complet des manuscrits de la Bibliothèque. Seuls les trois premiers volumes furent imprimés.

Avec l'occupation de Rome par les armées françaises puis napoléoniennes, la bibliothèque a subi des pertes en 1798-1799, selon le traité de Tolentino (1797). À la suite du congrès de Vienne, cependant, tous les volumes ou presque furent restitués.

Le pontificat de Léon XIII (1878-1903) marque un tournant décisif dans l'histoire de la Bibliothèque du Vatican. La bibliothèque vaticane commence alors à se développer non seulement comme lieu de conservation, mais aussi comme centre d'étude actif.

Au cours de cette période, les fonds de la bibliothèque de manuscrits et d'imprimés ont connu une croissance considérable. En 1891, est achetée la bibliothèque privée de la famille Borghèse, qui a été enrichie par les codices conservés de la collection papale d'Avignon. En 1894, la collection de l'archéologue Giovanni Battista de Rossi, qui a longtemps travaillé pour la bibliothèque vaticane est acquise. En 1902, les archives et la bibliothèque de la famille Barberini, fondée au XVII^e siècle et constituée de plus de 11 000 manuscrits latins, grecs et orientaux et de plus de 36 000 livres imprimés, dont environ 320 incunables rejoignent les collections vaticanes.

À la même époque, la bibliothèque a accueilli les manuscrits et les livres imprimés de la Congrégation de Propaganda Fide, dont la collection exceptionnelle du cardinal Stefano Borgia

(1731-1804), (aujourd'hui dans le fonds Borgiani) principalement connue pour ses codices du Proche-Orient et de l'Extrême-Orient. De plus, la collection est enrichie de documents d'archives et de manuscrits, et également de manuscrits musicaux, qui ont appartenu aux musiciens de la chapelle Sixtine. À la demande de Léon XIII, un atelier de restauration fut mis en place vers 1890. Aujourd'hui encore en activité, il est l'une des plus anciennes installations de ce genre réalisée au sein d'une bibliothèque.

En 1900, fut publié le premier volume de la série *Studi e testi*, toujours éditée par la Bibliothèque, et en même temps commença le catalogage scientifique des manuscrits, régi par un règlement détaillé, les *Leges*, imprimé en 1902.

En 1921, la collection du bibliophile Giovanni Francesco de Rossi, qui compte plus de 1200 manuscrits et environ 6000 livres imprimés rares, dont 2500 incunables entre à la bibliothèque. En 1923, c'est la bibliothèque de la famille Chigi qui fut offerte à Pie XI par le gouvernement italien, et les archives qui y étaient attachées furent transférées à la bibliothèque vaticane. La bibliothèque de la famille romaine Ferrajoli a été achetée quelques années plus tard en 1926.

Les années suivantes furent suivies de nombreuses autres acquisitions, moins connues, plus fragmentaires, mais non moins significatives pour la recherche.

Au cours de ces mêmes années, une subvention de la *Carnegie Endowment for International Peace* et la collaboration de la Bibliothèque du Congrès de Washington ont permis de perfectionner la formation professionnelle des bibliothécaires du Vatican. Cette formation eut pour répercussion la création d'un catalogue dictionnaire des livres imprimés, publié pour la première fois en 1931.

Dès 1907, la Bibliothèque vaticane proposait aux chercheurs un service de reproduction photographique. La collection des archives du chapitre de Saint-Pierre fut transférée à la bibliothèque vaticane en 1940, sous le pontificat de Pie XII (1939-1957). En plus des archives, elle contenait plusieurs manuscrits (400) et des livres imprimés anciens (500).

Sous l'impulsion du préfet dominicain Leonard E. Boyle (1984-1997), la bibliothèque a été automatisée. La mise en ligne du catalogue actuel des livres imprimés a débuté en 1986 et, depuis 1996, l'ensemble du catalogue est accessible en ligne. Les premiers projets pilotes de numérisation des manuscrits ont également été lancés avec la création du CED (Centre de traitement des données) de la bibliothèque. L'équipe de ce centre a d'ailleurs travaillé avec nous sur le projet du stage.

La bibliothèque s'est engagée au cours des siècles à maintenir le même esprit depuis sa fondation par Nicolas V. Elle tend à rester fidèle à l'engagement humaniste de l'institution et à offrir l'accessibilité aux collections du Saint-Siège à toutes et tous. Le développement du numérique est pour elle une opportunité de poursuivre sa mission.

Nous présentons ci-dessous un exemple d'utilisation du numérique pour la (re)découverte d'un manuscrit des collections dont la cotation est « Vat. lat. 1202 ».

Lors de la création des expositions virtuelles sur la plateforme numérique, pour certains ouvrages ont été créées des « cartes d'identité » présentant les catégories de renseignements suivantes :

Type de ressource :

Manuscrit

Collection :

Vat.lat.

Cotation :

Vat.lat.1202

Bibliothèque :

Bibliothèque apostolique du Vatican

Date :

1058-1087

Pays :

Italie

Région :

Italie du Sud

Localisation :

Monte Cassino

Matériaux :

membr.

Hauteur :

370

Largeur :

250

Nombre de feuillets :

262 (+ 19a, 140a, 182a, 216a, 219a ; -65-68 ; bis inveniens ff. 19 et 117, omissis et contra ff. 20 et 118)

Note générale :

Lectionarium in festis ss. Benedicti, Mauri et Scholasticae.

Tags de l'exposition :

Beneventana

Cette dernière indication, l'étiquette *Beneventana* fait référence à la présence du manuscrit au sein de l'exposition virtuelle « Paléographie Latine » pour l'illustration de la sous-partie sur l'écriture bénéventine⁶⁴ (Fig. 9 et 10). Ces étiquettes, nous y reviendrons, sont utilisées par la BAV pour réaliser

⁶⁴ « Spotlight, Latin Paleography », [s.d.], URL; <https://spotlight.vatlib.it/it/latin-paleography/feature/13-2-la>

des liens numériques entre leurs ressources. Ainsi la page de présentation du manuscrit sur lequel se trouve le texte scientifique du conservateur qui l'analyse⁶⁵ est reliée à un sujet plus large de paléographie. Nous allons étudier tout au long de ce mémoire quelles méthodes et outils ont été utilisés par la BAV pour associer les métadonnées de ses ouvrages entre elles.

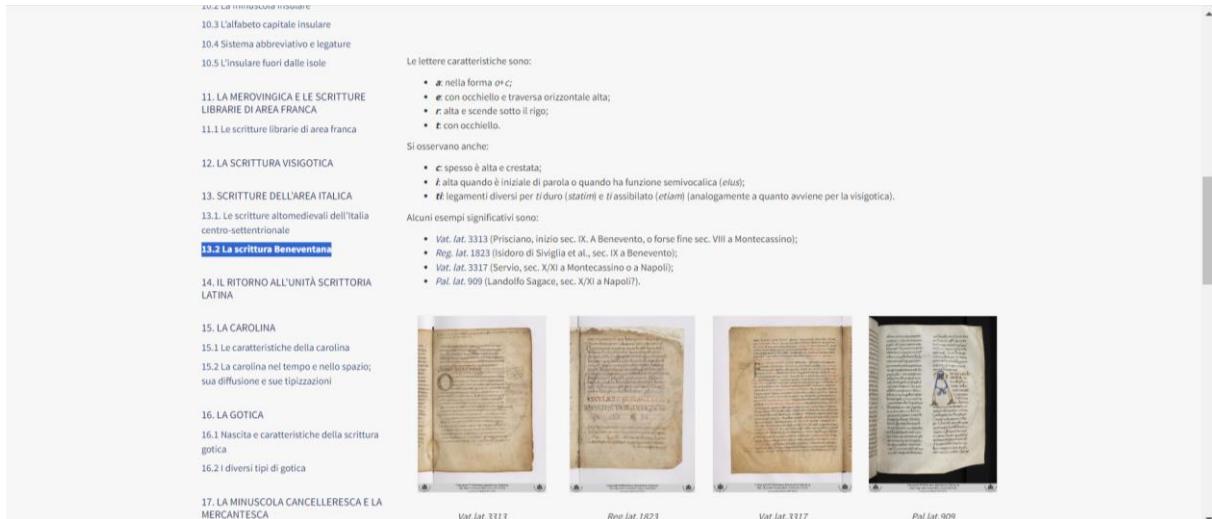
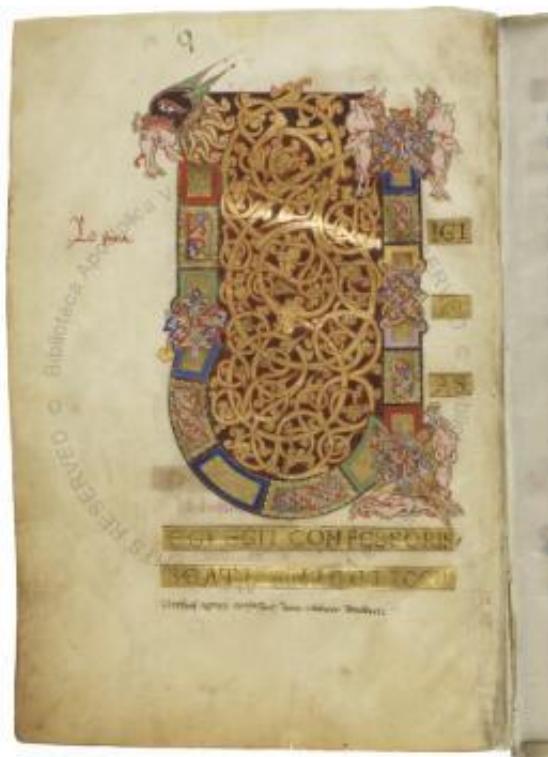


Fig. 9, Sous-partie de l'exposition « Paléographie latine », « L'écriture de Bénévent au XIe siècle : Bari et Cassinense ». Source : Spotlight, en ligne : <https://spotlight.vatlib.it/latin-paleography/feature/13-2-the-beneventan-script>. Consulté le 1er septembre 2024.

scrittura-beneventana. Consulté le 2 septembre 2024

⁶⁵ « Spotlight », [s.d.], URL: https://spotlight.vatlib.it/it/overview/catalog/Vat_lat_1202. Consulté le 2 septembre 2024.



Copyright © Biblioteca Apostolica Vaticana
https://doi.org/10.14201/vatlib-MDS_VatLat12020019
powered by SPOTLIGHT 2024

Fig. 10, Détail du Vat.lat.1202 illustrant la sous-partie « L'écriture de Bénévent au XIe siècle : Bari et Cassinese ». Source : Spotlight, en ligne : <https://spotlight.vatlib.it/latin-paleography/feature/13-2-the-beneventan-script>. Consulté le 1er septembre 2024.

II/ La mise en pratique de l'intelligence artificielle sur des fonds patrimoniaux

1) La Vaticane et le numérique

A. Appliquer l'IA aux manuscrits : protocole et fonctionnement

Nous allons à présent décrire le projet de la BAV, les différentes étapes de l'utilisation de l'intelligence artificielle au cours du projet et les résultats obtenus.

Comme nous l'avons vu en première partie, le service de coordination informatique de la bibliothèque a commencé, il y a déjà plusieurs années, une politique de projets de valorisation numérique des collections.

Leur nouveau projet consistait à utiliser un réseau de neurones convolutifs (CNN), particulièrement indiqué pour la reconnaissance d'images sur les manuscrits. Le but de l'utilisation de ce réseau neuronal était de nous aider à identifier les éléments qui componaient les miniatures des manuscrits et créer automatiquement des annotations IIIF⁶⁶ pour chaque objet, personne ou animal identifié par le réseau. L'architecture des connexions des réseaux de neurones convolutifs s'inspire de celle du cortex visuel des mammifères. Les réseaux se composent d'un ensemble de neurones multicouches, des fonctions mathématiques avec plusieurs paramètres variables, qui traitent de petites quantités d'informations. Les réseaux convolutifs se distinguent par leurs premières couches convolutives. Une couche convulsive repose sur le principe mathématique de convolution et vise à détecter la présence d'un motif (dans une image notamment)⁶⁷. La première couche convulsive peut repérer les contours des objets, la seconde couche peut combiner les contours en objets, et les couches suivantes peuvent utiliser ces informations pour différencier une voiture d'une moto sur l'image.

Il est dit que les réseaux de neurones convolutifs s'inspirent de la vision des mammifères car les cerveaux sont composés de "neurones" qui "s'allument" en émettant des signaux électriques vers d'autres neurones une fois qu'ils ont été suffisamment "activés". Il est important de ne pas prendre cette analogie au pied de la lettre, les neurones biologiques pouvant accomplir des actions que les neurones artificiels ne peuvent pas exécuter, et vice versa, mais elle est intéressante pour saisir ce parallèle biologique⁶⁸.

Nos réseaux biologiques sont structurés de façon hiérarchique. L'étude des neurones du cortex visuel des chats par les chercheurs David Hubel et Torsten Wiesel a révélé cette structure hiérarchique dans les années 1950. Après avoir exposé le chat à différents stimuli tels que des taches sombres, des taches claires, des gestes de la main et même des photos de femmes dans des magazines, ils n'ont pu constater d'activation neuronale. Cependant, alors qu'ils retiraient une diapositive du projecteur à un angle diagonal, ils ont constaté une activité neuronale et se

⁶⁶ Voir III/1) B. Interopérabilité et standard IIIF

⁶⁷ « Réseau de neurones convolutif », Data Analytics Post, [s.d.]. URL : <https://dataanalyticspost.com/Lexique/reseau-de-neurones-convolutifs/>. Consulté le 31 août 2024.

⁶⁸ « Stanford University CS231n: Deep Learning for Computer Vision », Data Analytics Post, [s.d.]. URL : <https://cs231n.stanford.edu/>. Consulté le 31 août 2024.

sont aperçus que les bords diagonaux à un angle très spécifique stimulaient l'activation de certains neurones du chat.

Les chercheurs ont expliqué cette stimulation par l'évolution de l'espèce. Puisque les milieux naturels sont souvent imprédictibles, la perception d'un « bord », d'un angle qui contraste avec l'arrière-plan, peut signifier pour un félin la présence d'un objet ou d'un être vivant. Quand une certaine combinaison de neurones est activée, ces activations se combinent pour en donner une encore plus abstraite, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'abstraction finale soit un concept utile, tel que « oiseau » ou « chien ».

Un réseau neuronal profond consiste à reproduire une structure similaire en utilisant des couches de neurones artificiels.

Il fonctionne selon la fonction mathématique suivante :

$$F(X) + \text{entraînement} = Y$$

Dans notre cas, X équivaut aux numérisations de manuscrits et Y, le résultat, aux identifications dont nous dotons les numérisations. L'entraînement dans la fonction ci-dessous représente les données labellisées utilisées pour l'apprentissage.

Graphiquement, un réseau neuronal profond résolvant une classification d'images ressemble à ceci :

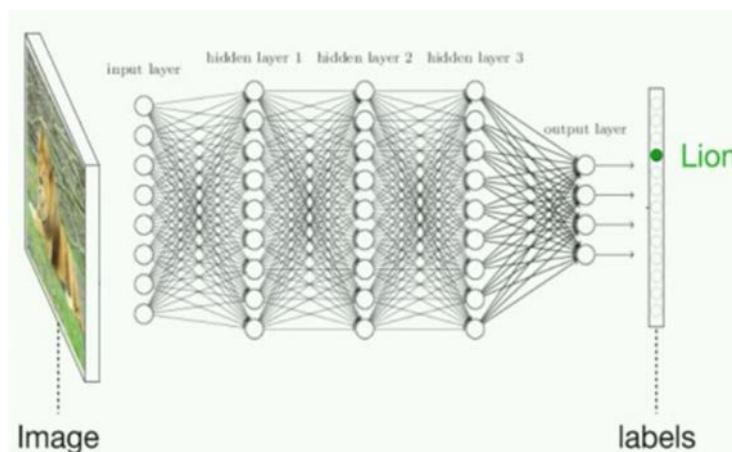


Fig. 11, Illustration du processus du Deep Learning d'une image à une étiquette. Source : MAINI (Vishal), « Machine Learning for Humans, Part 4: Neural Networks & Deep Learning », en ligne : <https://medium.com/machine-learning-for-humans/neural-networks-deep-learning-cdad8aeae49b>. Consulté le 5 août 2024.

C'est une équation mathématique immense, avec de multiples paramètres. L'entrée X consiste en pixels d'images, la sortie Y correspond à un vecteur de classe de probabilités (c'est-à-dire la probabilité que l'image soit un « chat » ou un « chien »). Si le réseau neuronal fonctionne correctement, la classe la plus probable trouvée en sortie doit être correcte. Ainsi, avec beaucoup d'exemples et beaucoup d'échanges, le modèle peut apprendre à classer correctement les images d'animaux. Les réseaux neuronaux profonds sont plus difficiles à interpréter car les

caractéristiques sont apprises mais tout est dans l'imagination de la machine. C'est ce que l'on nomme l'apprentissage profond⁶⁹.

Pour réussir à faire reconnaître sur les manuscrits médiévaux de la BAV les différents éléments qui constituent les enluminures, il fallait tout d'abord coder et entraîner l'algorithme à segmenter les pages numérisées, pour permettre qu'un certain nombre d'éléments visualisés sur chaque page soit séparé. « You only look once », (YOLO), est un algorithme de détection d'objets, qui utilise un réseau neuronal artificiel pour détecter et identifier des objets. Il a été codé par les experts de la Vaticane pour être appliqué sur les collections.

En comparaison avec des systèmes de détection plus récents, YOLO est très rapide⁷⁰. En effet, il analyse l'entièreté de l'image pendant la phase d'apprentissage et le test, ce qui lui donne la possibilité d'encoder l'ensemble de l'image simultanément, y compris l'arrière-plan, avec des informations contextuelles sur les classes et leur apparence. L'image d'entrée est divisée en une grille de cellules en petits carrés (Fig. 12).

Les boîtes de délimitation et les scores de confiance sont prédictibles pour chaque cellule de la grille. Les scores de confiance témoignent de la confiance du modèle quant à la présence d'un objet dans la boîte, ainsi que de la précision de la boîte qu'il estime prédire.



Fig. 12, Schéma de la segmentation effectuée par l'algorithme sur une page de manuscrit.
Source : © Camille Ferrari.

Les couches de réseau convolutives extraient les caractéristiques de l'image, tandis que les couches connectées prédisent les probabilités et les coordonnées de sortie. La couche finale prédit à la fois les probabilités de classe et les coordonnées de la boîte englobante. YOLO prédit donc en même temps toutes les boîtes de délimitation de toutes les classes d'une image, d'où

⁶⁹ MAINI (Vishal), « Machine Learning for Humans, Part 4: Neural Networks & Deep Learning », en ligne : <https://medium.com/machine-learning-for-humans/neural-networks-deep-learning-cdad8aeae49b>. Consulté le 5 août 2024.

⁷⁰ REDMON (Joseph), DIVVALA (Santosh), GIRSHICK (Ross) et al., *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*, 9 mai 2016. URL : <http://arxiv.org/abs/1506.02640>. Consulté le 5 août 2024.

son nom, « Vous ne regardez qu'une seule fois », pour indiquer les objets présents sur l'image et leur localisation. YOLO n'est cependant pas aussi précis que les systèmes de détection les plus récents. Malgré sa capacité à reconnaître rapidement les objets sur les images, il a du mal à localiser certains objets, notamment les plus petits⁷¹.

Il a donc fallu coder l'algorithme pour lui demander de sélectionner seulement les manuscrits de la Vaticane contenant au moins plus de cent enluminures. Le réseau neuronal artificiel a alors sélectionné 115 manuscrits des collections. La matérialité des ouvrages a bien souvent influencé les résultats. Il y avait souvent des réglettes de couleurs numérisées au sein des manuscrits que le réseau a pris pour des enluminures. C'est également le cas de toutes les partitions musicales, prises pour des enluminures également (Fig. 13). Après une première correction à la main appliquée sur ces résultats, nous sommes passés de 115 manuscrits sélectionnés, à 75.

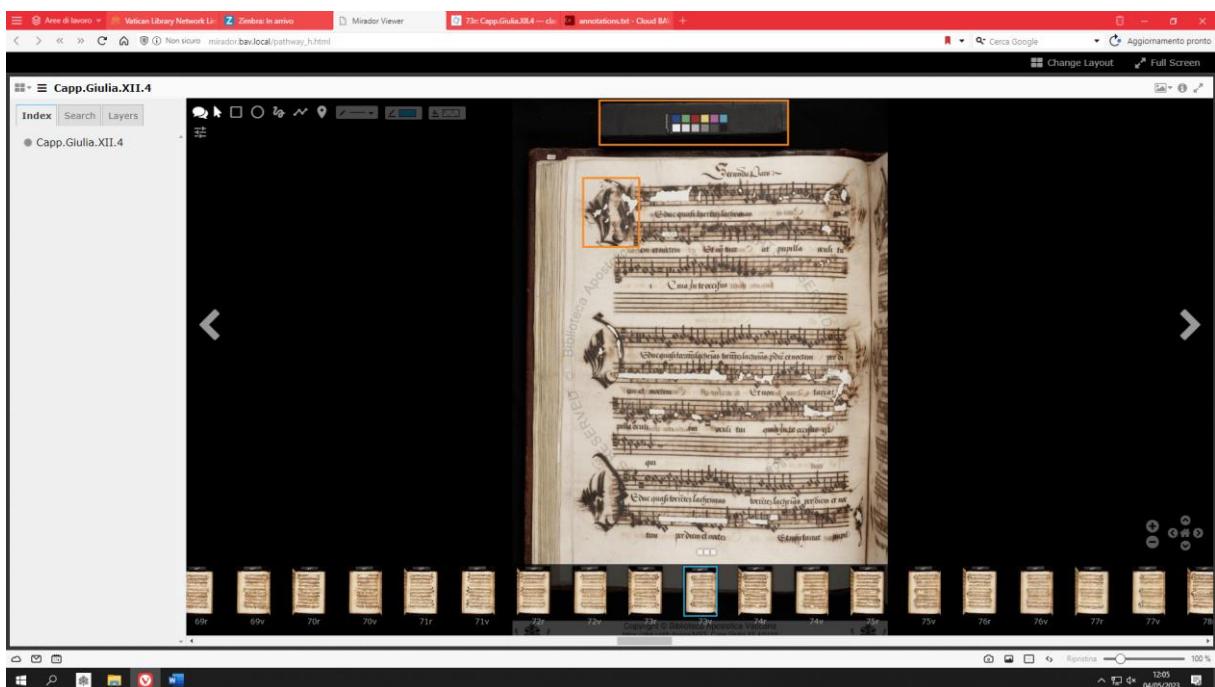


Fig. 13, Capp. Giulia. XII. 4, folio 73 verso, Palette de couleurs et clef de musique ayant faussé les résultats de l'algorithme. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

Dans un deuxième temps, l'algorithme a été codé pour lancer une reconnaissance d'objets, d'animaux, d'éléments sur ces segmentations. En l'occurrence pour notre projet, nous étudions spécifiquement les animaux, donc nous avons utilisé l'algorithme, entraîné sur les milliers d'images d'animaux présents dans la base de données de COCO, pour tenter de les identifier dans les manuscrits.

⁷¹ *Ibid.*

COCO (*Common Object In Context*), est une base de données qui contient 91 types d'objets communs⁷². Au total, l'ensemble de données comporte 2 500 000 instances étiquetées dans 328 000 images.

Les ensembles de données ont joué un rôle crucial tout au long de l'histoire de la recherche en vision par ordinateur. Ils offrent non seulement la possibilité d'entraîner et d'évaluer les algorithmes, mais également de guider la recherche vers de nouvelles orientations. Trois groupes de données sont associés à la reconnaissance d'objets : la classification d'objets, la détection d'objets et l'étiquetage sémantique des scènes.

La classification d'objets nécessite des étiquettes indiquant la présence ou non d'objets dans une image. La détection d'un objet consiste à localiser l'objet dans l'image et à l'identifier comme appartenant à une classe spécifiée. En raison de la forte dépendance des informations contextuelles pour détecter de nombreux objets tels que les téléphones portables ou les chaises, il est essentiel que les ensembles de données de détection contiennent des objets positionnés dans leur environnement naturel. L'identification des objets sémantiques d'une scène nécessite que chaque pixel d'une image soit identifié comme faisant partie d'une catégorie, comme le ciel, une chaise, le sol, *etc.*

La compréhension des scènes implique de nombreux éléments, notamment la reconnaissance des objets présents, leur localisation, la détermination de leurs attributs et de leurs relations avec une description sémantique de la scène. Les ensembles de données actuels de classification et de détection d'objets aident à la compréhension de la scène. Cependant les systèmes de reconnaissance actuels sont encore peu performants sur les objets en arrière-plan ou au milieu d'un fouillis⁷³.

Il est difficile de dénicher des images naturelles avec plusieurs objets et de nombreux objets ne peuvent être identifiés qu'à partir du contexte, parce qu'ils sont petits ou parce qu'ils semblent ambigus dans l'image. Il faut avoir des images de scènes avec un contexte d'ensemble et non des objets isolés pour faire progresser l'identification.

Des catégories d'objets et de choses à inventorier ont été choisies par les chercheurs. La recherche de paires de catégories scène/objet a également été effectuée pour l'ensemble des données afin de permettre aux images de présenter des relations contextuelles entre les objets et de faciliter leur identification. On a ensuite étiqueté toutes les instances des catégories d'objets de chaque image.

Dans certaines catégories (par exemple « chien », « chat »), les modèles entraînés sur COCO sont moins performants que pour d'autres (comme « bus » ou « télévision »)⁷⁴.

Plus de 70 000 heures de travail ont permis de regrouper, d'annoter et d'organiser une grande quantité d'instances d'objets afin de faire avancer les algorithmes de détection et de segmentation d'objets.

⁷² LIN (Tsung-Yi), MAIRE (Michael), BELONGIE (Serge) et al., *Microsoft COCO: Common Objects in Context*, 20 février 2015. URL : <http://arxiv.org/abs/1405.0312>. Consulté le 5 août 2024.

⁷³ *Ibid.*

⁷⁴ *Ibid.*

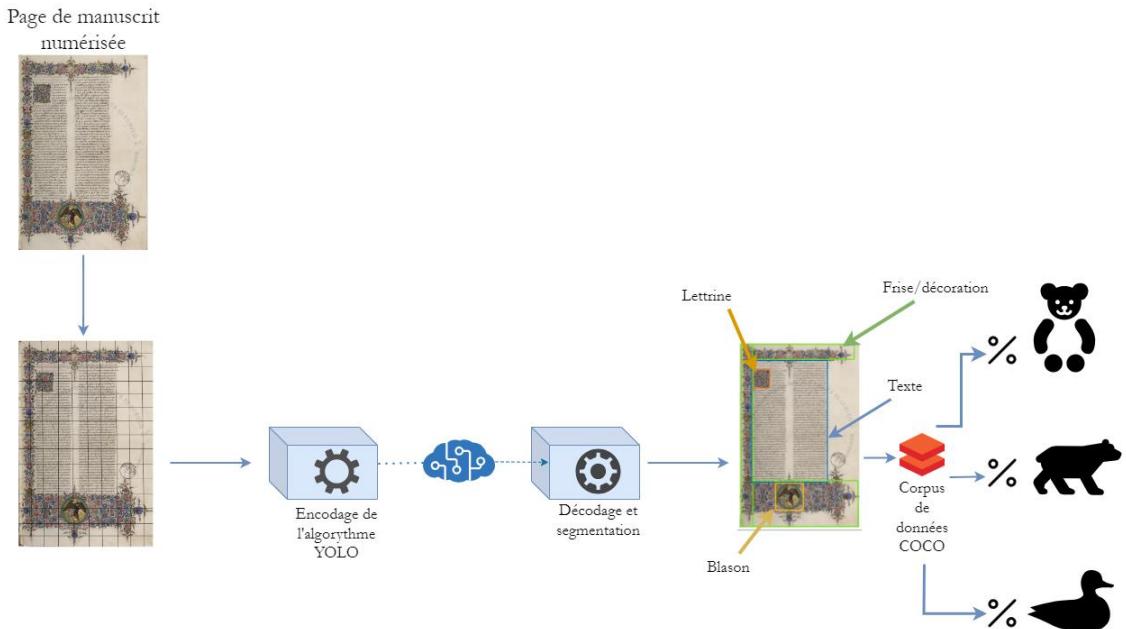


Fig. 14, Processus d'utilisation du CNN de la numérisation du manuscrit jusqu'à la reconnaissance d'un objet. Source : © Camille Ferrari.

Dans notre cas de figure, comme nous voulions travailler sur la thématique des animaux, le réseau a été relancé avec pour consigne de reconnaître sur les pages numérisées des manuscrits, les dix animaux pour lesquels COCO était entraîné à la reconnaissance, sur des images modernes (Fig. 14).

Les résultats de cette opération étaient donnés sous la forme suivante :

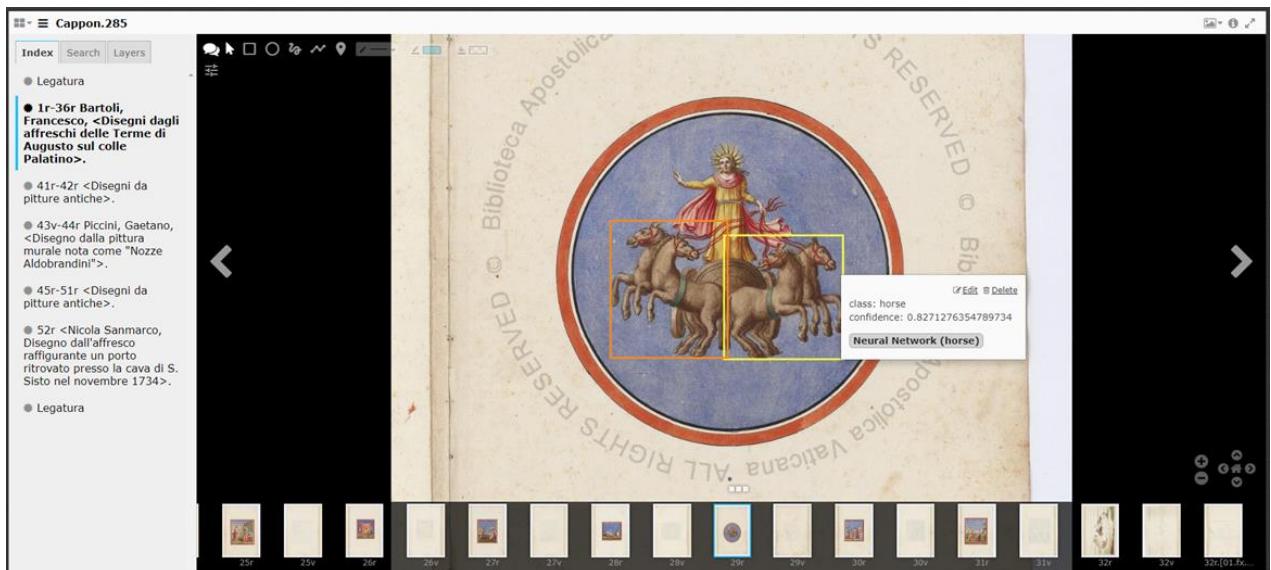


Fig. 15, Cappon.285; folio 29 recto. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

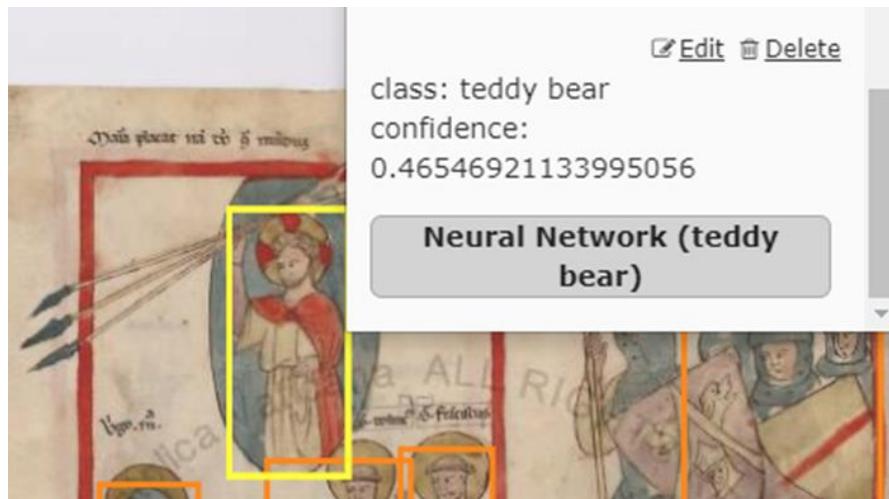
Ce sont des annotations automatiques *mirador* avec le tag de l'animal qu'a identifié le réseau et un taux de « confidence », de certitude, entre 0 et 1, qui équivaut en réalité à un pourcentage : plus on est proche de 1, plus le réseau est certain que c'est bien un cheval dont il s'agit. Dans l'exemple ci-dessus, il est certain à 82 pour cent d'identifier un cheval (Fig. 15).

B. Les limites du *deep learning*

La limite qui a très vite été perçue dans le projet de la BAV résidait dans le fait que des images d'animaux modernes représentés dans des environnements contemporains ne correspondent pas à des représentations zoologiques de manuscrits.

C'est l'une des causes principales des mauvaises performances des algorithmes du *deep learning*⁷⁵. Les données d'apprentissage doivent normalement être assez représentatives et correspondre aux images du test, ce qui permet ainsi au modèle de prédiction de mieux généraliser et adapter ce qu'il a appris. Une fois le réseau de neurones convolutifs entraîné sur les données d'images contemporaines de la base COCO, comment a-t-il transposé ce qu'il a appris sur des données qu'il n'avait pas encore « vues », à savoir de l'iconographie médiévale ? S'il se base sur des données d'apprentissage contemporaines alors que les données qu'on lui donne à traiter sont médiévales, le biais d'erreur est considérable et les erreurs d'anachronisme courantes.

C'est l'une des limites qui a été rencontrée par la Vaticane à l'issue du premier lancement de l'algorithme. Le réseau de neurones a identifié des *frisbees*, des *teddys bears* et des battes de *baseball* sur les manuscrits (Fig. 16 et 17).



⁷⁵ BENZAKI (Younes), « Overfitting et Underfitting : Quand vos algorithmes de Machine Learning dérapent ! », *Mr. Mint : Apprendre le Machine Learning de A à Z*, 11 juillet 2017. URL : <https://mrmint.fr/overfitting-et-underfitting-quand-vos-algorithmes-de-machine-learning-derapent>. Consulté le 5 août 2024.

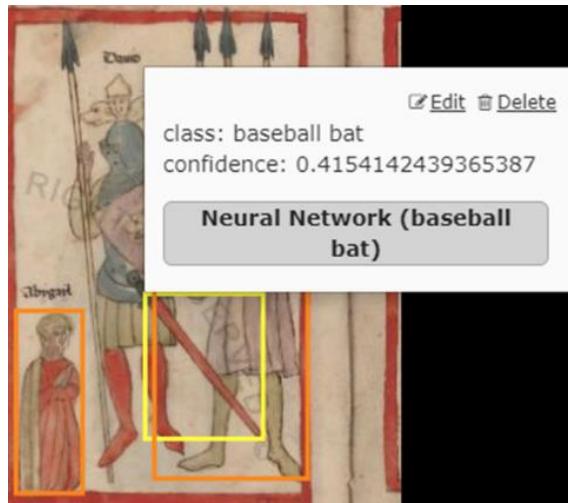


Fig. 16 et Fig. 17, Reg.lat.99; folio 39 verso, Identification par le réseau neuronal d'ours en peluche et de bat de baseball. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

Face à ce constat, il a été entrepris de corriger à la main les résultats et d'annoter tous les animaux des manuscrits que le réseau n'avait pu trouver et/ou identifier pour que, grâce au principe du *deep learning*, il apprenne de ses erreurs, se perfectionne et réussisse à mieux distinguer certains animaux avec un degré de certitude plus élevé en étant relancé. C'est dans le processus de labellisation à la main des éléments que rentre en jeu l'intelligence humaine (Fig. 18).

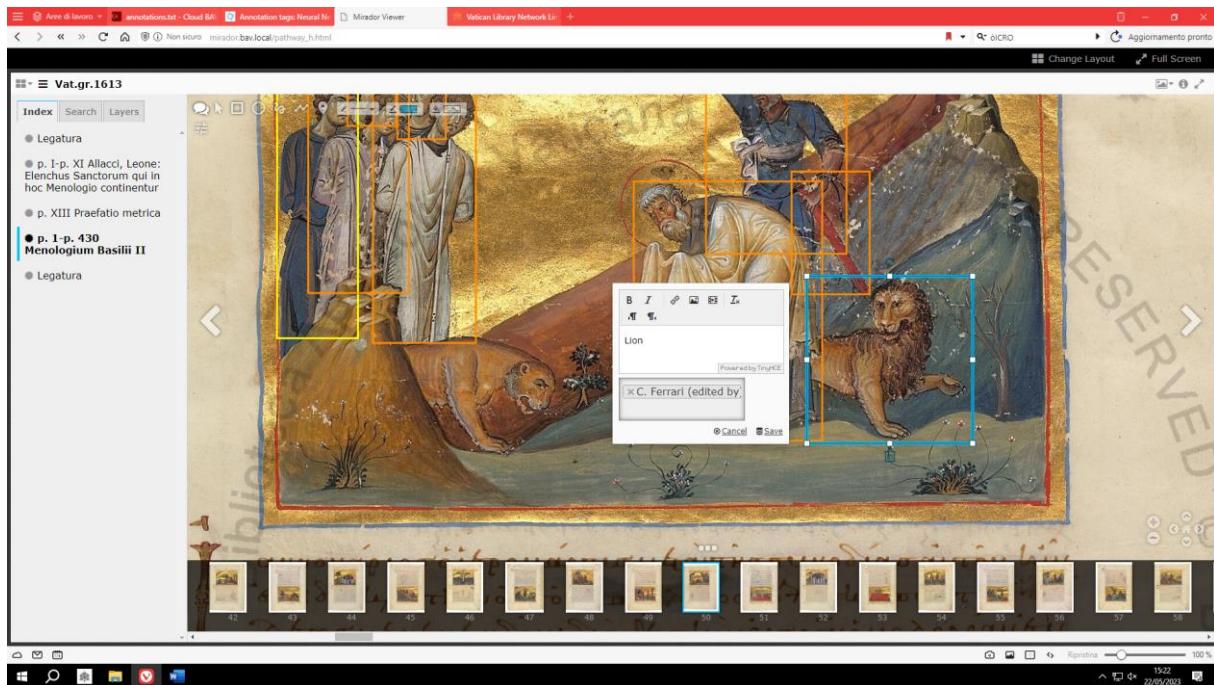


Fig. 18, Vat. gr. 1613, folio 50. Correction à la main de l'identification d'un lion. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

Par exemple, un ouvrage qui a beaucoup été étudié est le Urb. Lat. 276, un magnifique bestiaire qui a permis de rajouter plusieurs centaines d'espèces (321 espèces en plus, par rapport aux dix

initiales proposées par COCO)⁷⁶. La théorie émise par la BAV essaye d'amener l'algorithme à acquérir un vocabulaire et une reconnaissance plus adaptés aux sources humanistes sur lesquelles il était appliqué, à force de le relancer et de le perfectionner.

C. Codicologie et numérique font-ils bon ménage ?

Comme nous l'avons évoqué en première partie, les fonds de la Vaticane utilisés pour ce travail sont les mêmes que pour le précédent projet de trois ans mené grâce au soutien de la Fondation Mellon. Il semblait important de rappeler ici le contexte d'utilisation de ces manuscrits sur la plateforme numérique Spotlight et notamment les questions de codicologie qui ont émergé lors de leur mise en ligne.

Parmi les cinq parcours qui composent le « Projet Mellon », deux d'entre eux accordent une large place à des questions plus iconographiques. Le parcours virtuel sur les classiques latin est entièrement construit autour de la question du rapport entre image et texte tandis que le dernier parcours publié en date, « La bibliothèque d'un prince humaniste », propose au sein de son exposition virtuelle de nombreuses notices et annotations IIIF sur ces aspects.

L'entièreté de la plateforme a été construite sur une seule et même idée : en diffuser le contenu. Rassembler, trier, connecter des notices entre elles et diffuser au plus grand nombre les fonds de la Vaticane en était l'objectif principal. Dès lors, comment rapprocher l'objet-livre, qui s'étudie dans les salles de la bibliothèque grâce aux sens, et le Spotlight dans lequel les manuscrits vont être mis en avant ?

De nombreux aspects méthodologiques ont dû être pris en compte et Eva Ponzi en dresse une liste dans son article⁷⁷.

Elle y évoque notamment les risques de l'opération : le flux conséquent des images et métadonnées rassemblées sur la plateforme pourrait déboussoler l'usager.

Il était donc impératif de revenir sans arrêt à l'objet-livre et de se référer toujours au codex, au centre du dialogue, en prenant en compte sa nature physique et son contenu. Le rapport entre texte et image dans ses multiples articulations devait être pris en compte pour la rigueur scientifique des notices.

Grâce à l'emploi du standard IIIF, les manuscrits ont été explorés sous un nouvel angle. En témoigne l'exemple du codex Urb. Lat. 350, un des manuscrits les plus célèbres de la collection du duc d'Urbino, Federico da Montefeltro. Il doit sans doute son langage figuratif à la collaboration entre les enlumineurs du XV^e siècle, Francesco di Antonio del Chierico et Bartolomeo di Domenico di Guido. Dans les incipit du codex sont représentées des initiales travaillées ainsi que des interventions narratives⁷⁸.

⁷⁶ Pour avoir un aperçu des étiquettes, voir Annexe C.

⁷⁷ MANONI (Paola) et PONZI (Eva) « Thematic Pathways on the Web: IIIF annotations of manuscripts from the Vatican collections: il “Progetto Mellon” della Biblioteca Vaticana. La storia della miniatura incontra lo Spotlight », *Rivista di storia della miniatura* 24, 2020, p. 211-216.

⁷⁸ *Ibid.*

Le rapport entre texte et image, souligné par l'annotation IIIF, s'articule donc sur un double registre : les lettres de l'incipit sont à la fois des « indicateurs parlants »⁷⁹, c'est-à-dire porteurs d'un thème figuratif (issu de modèles iconographiques), et des « indicateurs muets », leur seule présence graphique incitant le lecteur à s'y attarder. Par ailleurs, le codex n'a pas été élaboré pour le seigneur d'Urbino comme le montrent les armoiries probablement ajoutées ultérieurement. En zoomant sur l'image, et en ayant la possibilité de l'annoter, il est possible de constater la sérialisation des manuscrits, système de production particulier dans lequel les armoiries ne sont visibles que comme un sceau d'achat.

Les différentes conceptions de la relation texte/image sont clairement mises en évidence par le Spotlight et son vaste système d'annotations.

Toutes les caractéristiques du livre – liées à l'articulation entre contenu textuel et décoratif/illustration, (sans pour autant négliger les éléments ou indications paléographico-codicologiques : colophon, notes de possession, *etc.*) sont donc mises en évidence par des annotations, pour que le public puisse découvrir l'objet physique par le biais d'images numériques annotées.

C'est à ce niveau que le IIIF, le Spotlight et le bibliothécaire trouvent leur symbiose: ce qui peut être décrit par la seule force du mot dans un catalogue imprimé est ici ancré à l'image numérique correspondante. Présenter le catalogage par le texte et l'image, c'est proposer une connaissance plus large, amplifiée dans son potentiel, à la fois en termes de recherche historiographique et d'implication d'un public plus large.

L'exemple du codex Urb. lat. 350 montre comment la numérisation et l'annotation des images peuvent enrichir la compréhension de la relation texte-image et permettre une exploration plus approfondie des manuscrits, même pour ceux qui ne peuvent pas les consulter physiquement.

Chaque annotation est toujours suivie d'un ensemble de tags se référant à des catégories précises. La liste est placée sur la page d'accueil, facilement identifiable, afin de permettre au lecteur de développer sa propre recherche personnelle, en fonction de ses intérêts ou de ses curiosités. Cependant il est encore assez difficile de trouver une terminologie commune pour décrire les éléments décoratifs et illustratifs du manuscrit⁸⁰.

L'approche méthodologique qui a orienté la construction des pages a été la correspondance entre le moment de l'écriture et le moment de l'illustration, le contenu textuel étant toujours lié à un dispositif de commentaire visuel qui ouvre en même temps de nouvelles possibilités d'interprétation.

Toutes les sous-parties de l'exposition – La production florentine, La production de la vallée du Pô et de Ferrare, La production d'Urbino, Manuscrits extravagants – sont aussi une voie d'accès supplémentaire pour l'utilisateur à ce système complexe de connexions qui tient ensemble, bien que médiatisé numériquement, l'instance esthétique et historique des manuscrits (Fig. 19).

⁷⁹ MANONI (Paola) et PONZI (Eva), *op. cit.*

⁸⁰ Voir III/1) C. Les limites de la « découvrabilité »

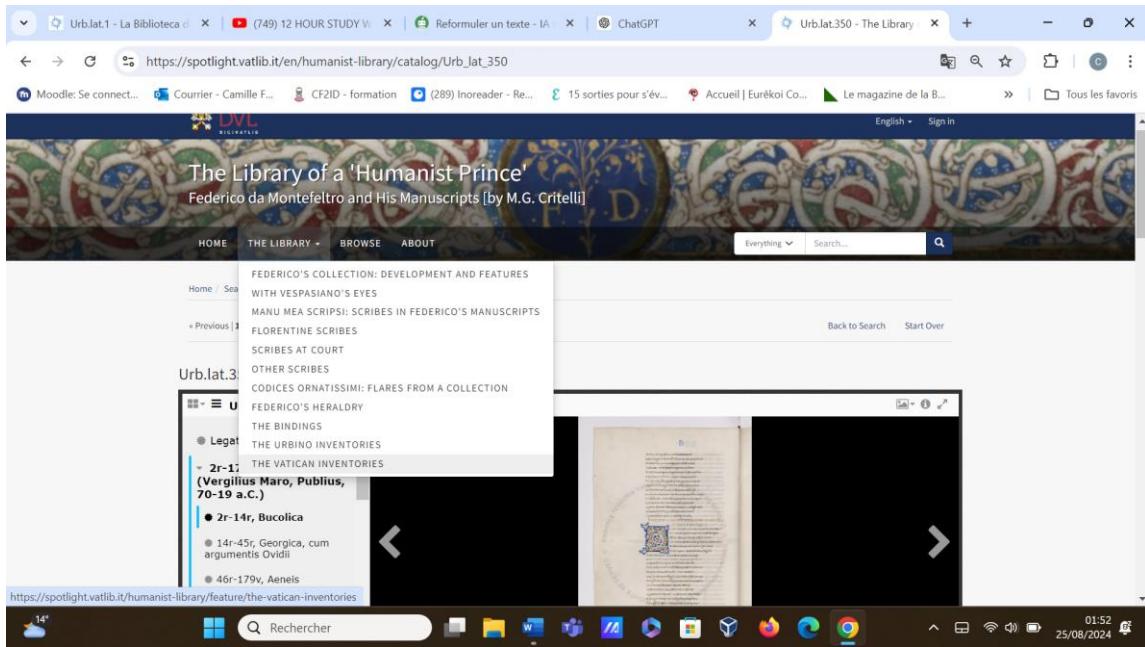


Fig. 19, Page d'accueil avec menu déroulant de l'exposition virtuelle « Bibliothèque d'un prince humaniste ». Source : Spotlight, en ligne : <https://spotlight.vatlib.it/humanist-library>, Consulté le 2 septembre 2024.

Pour la thématique des animaux médiévaux sur laquelle nous avons travaillé, la question de la pertinence d'une plateforme numérique se pose. Michel Pastoureau dans son dernier ouvrage paru, *L'historien face à l'animal*⁸¹, précise qu'un médiéviste se doit d'aller en bibliothèque voir les manuscrits originaux. Consulter des images sur écran et uniquement sur écran lui fait perdre une bonne partie des informations qu'il pourrait en retirer, à commencer par celles qui concernent leur matérialité.

Il précise, qui plus est, dans son propos, que, dans les manuscrits enluminés, pour chaque miniature, « les dimensions, l'emplacement dans l'ouvrage, la qualité de l'exécution, le compartimentage, l'association avec d'autres parties du décor » sont toujours des éléments chargés d'une forte signification liée à l'animal représenté. Les enjeux ne sont pas seulement artistiques et codicologiques mais aussi hiérarchiques et symboliques. Tous ces choix sont cruciaux, que ce soit pour placer tel animal sur tel folio, après tel autre mais avant tel autre, lui consacrer une page complète ou une lettre historiée seulement, l'intégrer à une scène ou le traiter en portrait. e

Or il peut être difficile de jauger ces choix numériquement, d'autant plus au regard des résultats que l'intelligence artificielle a fournis durant le projet en tentant de retrouver et d'identifier les espèces d'animaux dans les ouvrages⁸².

⁸¹ PASTOUREAU (Michel), *L'historien face à l'animal: l'exemple du Moyen Âge*, éd. École nationale des chartes, Paris, 2023 (Collection « Propos »). D116 .P37 2023. ISBN : 9782357231818.

⁸² Voir Annexes A et B pour la liste des manuscrits concernés

Tout d'abord, le fait que la thématique de recherche se rapporte aux animaux, n'a peut-être pas amélioré la possibilité des erreurs matérielles commises par l'IA, comme ci-dessous, où des trous dans le papier ont été pris pour des oiseaux (Fig. 20).

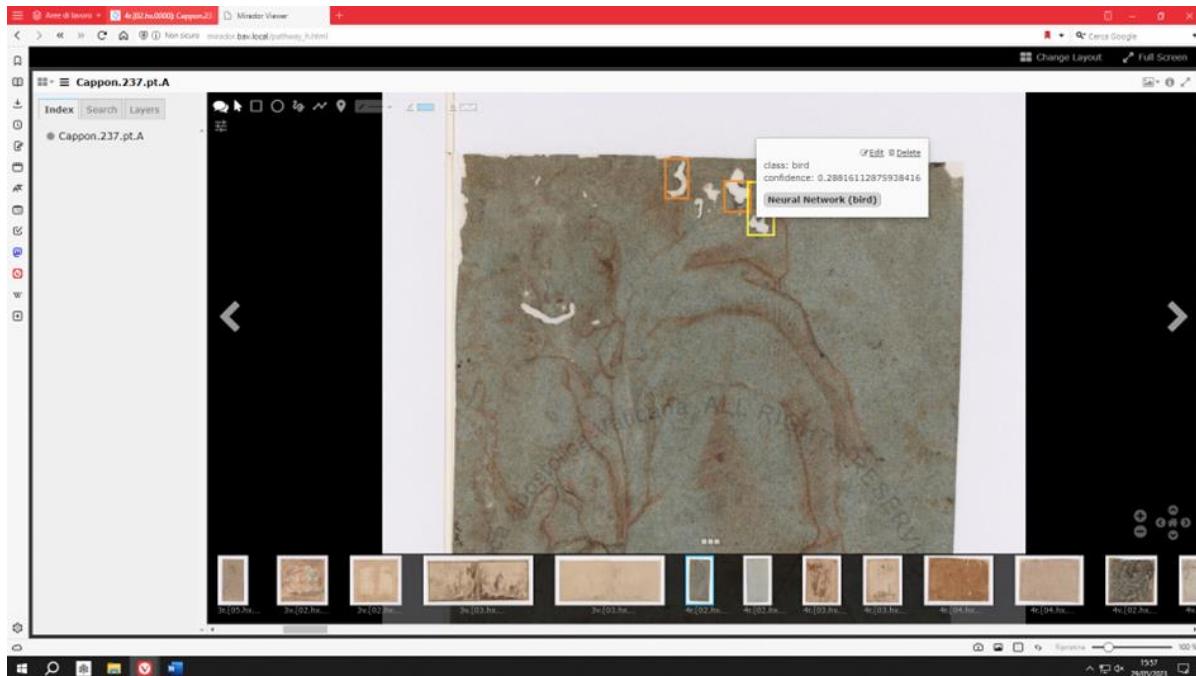


Fig. 20, Cappon. 237. Pt. 1, Folio 4(02) recto, illustration d'une erreur commise par l'IA, qui a confondu un oiseau avec un trou. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

Malgré cet exemple, le réseau a sélectionné avec réussite les oiseaux, ils sont la catégorie d'espèces qu'il a le plus trouvée.

Un exemple ci-dessous le démontre : dans le même manuscrit, le Urb.365, au même endroit sur la page du manuscrit, avec la même frise ornée et de la même taille, le réseau a réussi à identifier un oiseau (folio 106r) mais pas un mouton (folio 84r) (Fig. 21 et 22).

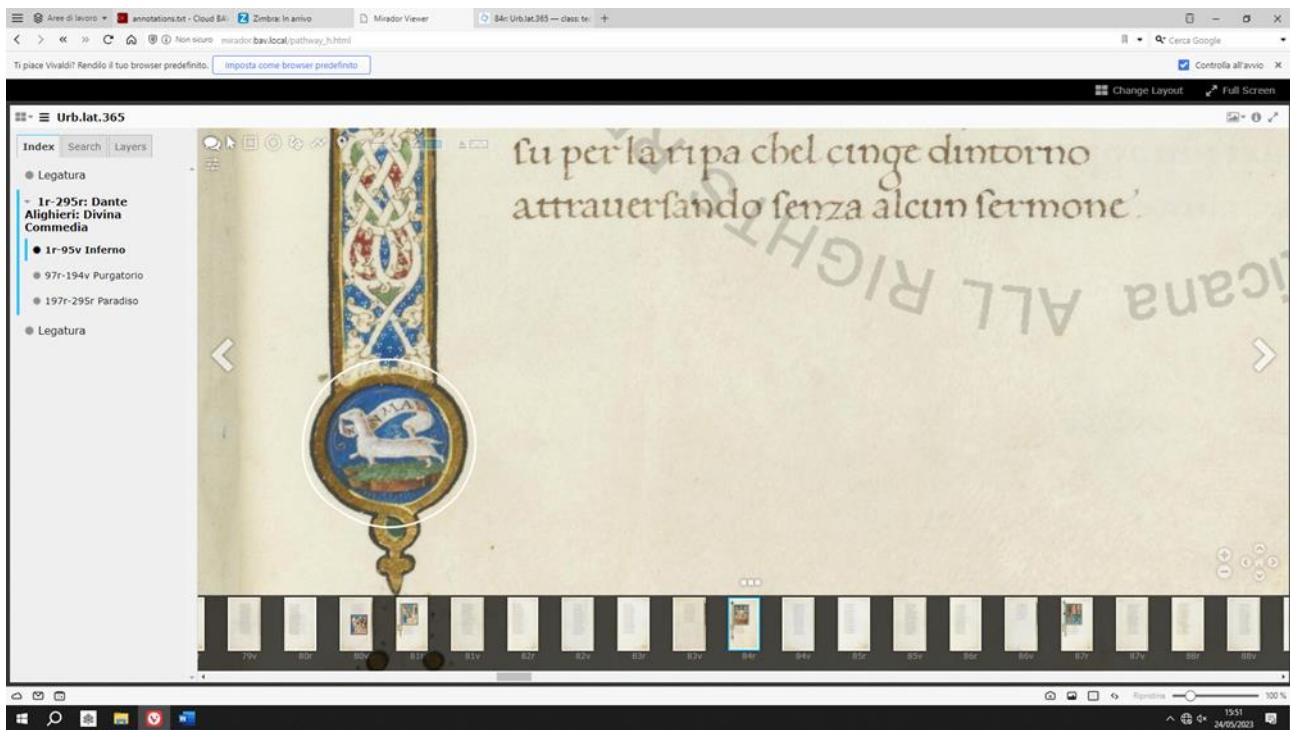


Fig. 21, Urb. 365, folio 84 recto, la machine n'a pas repéré l'animal dans le manuscrit. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

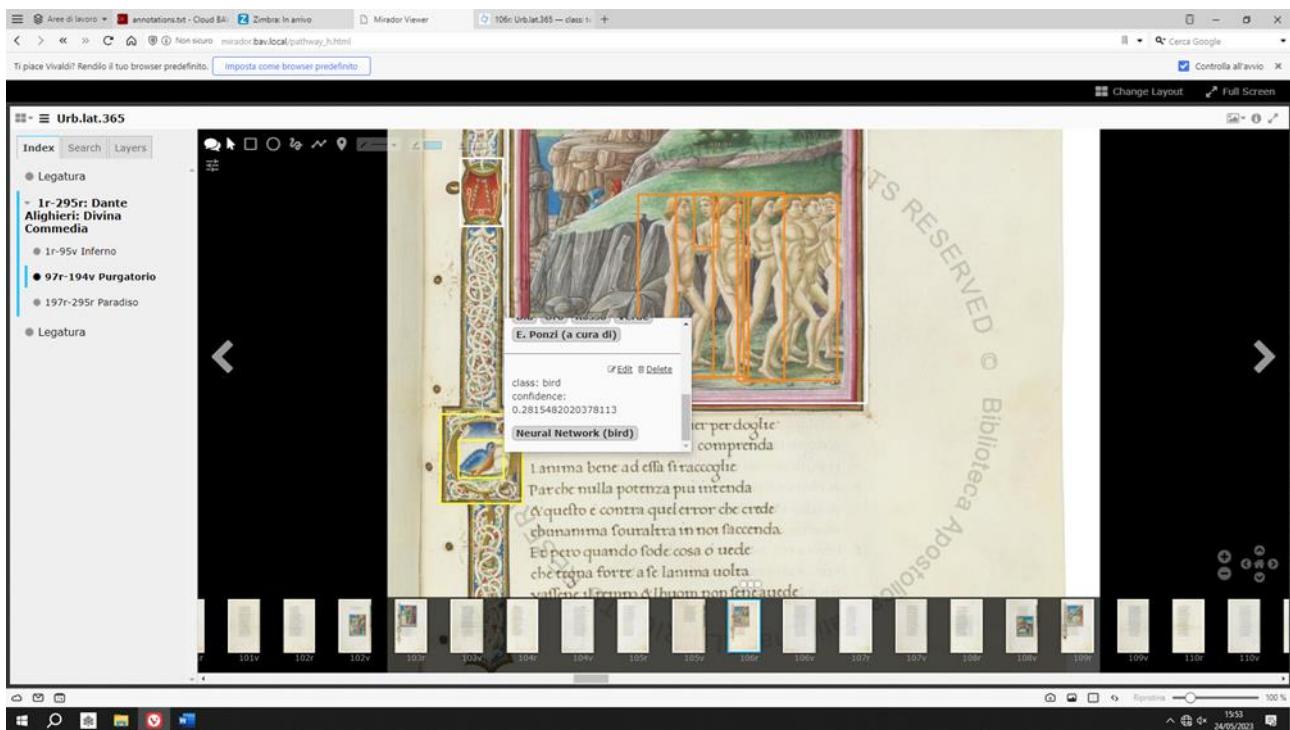


Fig. 22, Urb. Lat. 365, Folio 106r, la machine a identifié un oiseau. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

Cette disparité est certainement en partie due au corpus des animaux de la BAV. Le manuscrit contenant le plus d'annotations (1224) dans ses fonds n'est autre que le Pal.Lat.1071. Or c'est un ouvrage dont la majorité écrasante des identifications sont des oiseaux. Nulle surprise à cela, ce manuscrit dont l'exemplaire de la BAV est daté entre 1258 et 1266, est sans aucun doute l'un des traités de fauconnerie les plus connus au monde, écrit à l'origine par Frédéric II de Souabe.

Ce déséquilibre dans les données, 1346 oiseaux pour 54 moutons par exemple, peut donc expliquer la réussite du réseau à reconnaître certaines espèces. Comme nous l'avons vu, plus les données sont nombreuses et pertinentes, plus la réussite du réseau est conséquente. Cette théorie est également confirmée par la correcte identification par le réseau de la catégorie des chevaux (le corpus en contient plus de 250 représentations)⁸³.

Il serait intéressant de voir les résultats sur un corpus avec plus d'animaux dans certaines catégories et de voir si l'emplacement dans la page du manuscrit influence la découverte de l'animal ou non. En effet, nombreux sont les textes copiés au Moyen Âge qui parlent de l'animal mais l'animal n'est représenté que comme jouant un rôle secondaire en périphérie de la vie des saints jusqu'aux bestiaires du XII^e siècle qui commence à amener l'animal au centre du propos⁸⁴. En outre, près des trois quarts des bestiaires produits au XII^e et XIII^e siècles en Angleterre sont enluminés, mais pas de la même manière. Certains animaux considérés comme plus importants ont droit à plus de représentations : c'est le cas du lion, de l'ours, de l'aigle, de la licorne et du dragon. Le cerf, le sanglier, le loup, le cheval et quelques animaux domestiques quant à eux, n'ont droit qu'à une miniature de grande taille. En revanche, les oiseaux, les poissons, les serpents et les vers sont très peu représentés. Ces différences numériques de représentation influenceront obligatoirement les résultats de l'intelligence artificielle.

De plus, malgré la symbolique et les attributs, il reste toujours difficile de différencier certains animaux, les ovins et les bovins, les différentes espèces d'oiseaux, y compris sur un même manuscrit. L'identification doit parfois s'effectuer en étudiant des postures ou des rythmes : le taureau a la tête de face, la vache a la tête de profil. Le faucon pique de manière verticale tandis que l'aigle vole selon un axe oblique. Le dragon, quant à lui, n'est pas du tout représenté de la même manière d'un manuscrit à l'autre⁸⁵.

La diffusion d'un standard comme la IIIF conduit nécessairement les historiens de l'art et des miniatures à une nouvelle réflexion sur la discipline elle-même, sur ses modèles de narration et sur les perspectives d'avenir de la recherche. Néanmoins, la thématique de l'animal n'était peut-être pas la plus pertinente pour illustrer l'utilité et la pertinence de ces nouveaux outils.

⁸³ C'est exactement ce qu'ont également expérimenté les ingénieurs de la BNF pour le projet d'intelligence artificielle sur le corpus de Zoologie. (voir III) « Mandragore : jeu d'images annotées sur le thème de la zoologie | Api », [s.d.], URL : <https://api.bnf.fr/fr/mandragore-jeu-dimages-annotees-sur-le-theme-de-la-zoologie>. Consulté le 31 août 2024.

Comme beaucoup de bases de données, la répartition des classes de Mandragore est très déséquilibrée. L'ensemble de données de zoologie contient 41 641 annotations classées en 397 classes. La classe Oiseau contient 8467 instances alors que des classes comme Limace ou Putois ne contiennent qu'une seule instance.

⁸⁴ PASTOUREAU (Michel), *L'historien face à l'animal: l'exemple du Moyen Âge*, éd. École nationale des chartes, Paris, 2023 (Collection « Propos »). D116 .P37 2023. ISBN : 9782357231818.

⁸⁵ *Ibid.*

2) Quelques tentatives d'utilisation de l'IA sur les collections en bibliothèques et en musées

A. La conservation

Il est temps de nous attarder sur un ensemble non exhaustif de quelques exemples d'utilisation de l'intelligence artificielle dans des collections patrimoniales.

En 2018, la Bibliothèque nationale de France (BnF) a expérimenté, au travers d'une thèse de recherches, l'utilisation de l'intelligence artificielle en soutien aux missions du Département de la conservation. Dans le cadre de sa thèse de doctorat de science des données, menée en partenariat avec l'université Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines et la BnF, le chercheur Alaa Zreik a lancé le projet DALGOCOL (Fouille de Données et ALGORithmes de prédition de l'état des COLLections). Ce dernier consistait à tester la possibilité d'appliquer des techniques d'intelligence artificielle sur les métadonnées produites par la bibliothèque dans le cadre de ses activités de conservation. L'idée était de créer un outil d'aide à l'analyse et à la décision pour la conservation des collections, notamment les collections dont l'état est inconnu des bibliothécaires. La BnF possédant plus de 40 millions de documents et plus de 15 millions de notices, il est impossible de connaître de manière précise, l'état de tous les documents conservés. Or la charte de conservation de 2014 rappelle qu'une bonne politique de conservation ne peut se faire qu'en s'appuyant sur la connaissance de l'état des collections et avoir une meilleure connaissance de cet état faisait partie des objectifs de performances de la BnF pour les années 2017-2021⁸⁶.

Ce projet a donc duré trois ans et découlait d'une demande stratégique de la BnF pour mettre en lumière le fait que la conservation des documents était essentielle et qu'il était possible de le prouver par la donnée. Un autre projet complémentaire de 2017-2021 visait à évaluer l'état des collections grâce un échantillonnage de documents appartenant à un même fonds. La BnF voulait établir des statistiques en consultant un échantillon de 400 documents sur 20 000 pour tenter de classer les fonds selon leur degré de dégradation afin de prioriser les traitements de conservation préventive. Ce projet a été couplé avec DALGOCOL.

Pour la première fois, l'état des collections était évalué non pas par le diagnostic du personnel, mais par les données, grâce à un outil d'aide à la décision qui serait capable de prédire avec toutes les données produites par la BnF l'état physique des documents sans avoir besoin d'aller les examiner en magasin. En analysant les données pour créer une trajectoire de vie du document, son historique de conservation, ses traitements, ses communications, le but était d'identifier plus facilement les pans de collections qui nécessiteraient des traitements, parce que fragiles ou abimés.

La première année du projet a consisté à trouver des données qualitatives, pertinentes et disponibles pour nourrir le logiciel de cet historique de conservation des documents. Quatre types de données ont été choisies par défaut : les dégradations constatées sur les documents, les

⁸⁶ École nationale supérieure des sciences de l'information et des bibliothèques, « Aide à la décision pour la conservation et la gestion des collections », dans *Le Printemps des métiers | 1, 2, 3... IA ! Intelligence artificielle, métiers et compétences*, 11 mai 2023, URL : <https://www.enssib.fr/bibliothèque-numérique/notices/71190-l-aide-a-la-decision-pour-la-conservation-et-la-gestion-des-collections>. Consulté le 5 août 2024.

traitements de conservation⁸⁷, les communications à l'extérieur des magasins⁸⁸, et la communicabilité. Ce dernier critère bien que vaste, était le seul rempli à cent pour cent dans le système, étant obligatoire à la BnF. Ces quatre données sont des événements arrivés au document et non pas des descriptions précises des documents. Les données qui touchaient à la description du document étaient souvent non exploitables car lacunaires, inexistantes ou non écrites selon les bonnes normes. Ce travail a permis un enrichissement supplémentaire, celui de constater quelles données seraient pertinentes à l'avenir et utilisables pour l'IA.

Toutes ces données ont enrichi ce que l'équipe a baptisé la « trajectoire sémantique » du document, c'est-à-dire la succession des événements connus par le document dans le temps. Ils ont créé cette trajectoire sémantique pour la totalité du corpus (100 000 documents, essentiellement des monographies et des périodiques) à l'aide du premier algorithme qu'ils ont utilisé et qui est allé récupérer toutes les informations dans les bases de données et en a créé une trajectoire.

La principale difficulté de cette première année a résidé dans les métadonnées que la machine a récupérées. L'intelligence artificielle au contraire de l'intelligence humaine dissociaient totalement des termes différents (dus aux aléas des appellations au cours du temps) mais qui avaient pourtant la même signification, elle voyait par exemple une différence entre la « consolidation du corps du document » et « la consolidation de la couvrure ». Elle a relevé pas moins de 250 types de dégradations différentes et a trouvé 150 traitements de conservation. Or il n'existe pas autant de traitements à la BnF mais l'évolution des noms désignant certaines opérations de restauration l'ont induite en erreur.

La deuxième année a donc eu comme premier but de trier cette grande masse de métadonnées. Tous les termes employés dans les trajectoires ont été décrits, en créant des liens de similarité et en classant en famille et sous-familles les appellations. Ce fut un vrai travail d'ontologie pour définir chaque terme, sa signification, ses relations possibles entre les différents événements qui pouvaient affecter l'état du document⁸⁹. Il a fallu associer à chaque famille d'événements ses propres familles avec ses sous-familles respectives et décider entre tous ces termes, les similarités, les identiques et non identiques.

L'équipe du projet a rassemblé en groupe des trajectoires similaires pour en extraire une trajectoire type qui pourrait ensuite être comparée à celles des autres groupes. Elle a réussi à réduire à une quarantaine de trajectoires types comme modèles, qui sont devenues des outils de comparaison avec les nouvelles trajectoires qui seraient soumises au logiciel.

Une fois ses métadonnées nettoyées, triées et regroupées, elle a tenté ses premières prédictions : en se basant sur les trois données « dégradations, communications et traitements » de chaque trajectoire, elle a tenté de calculer la probabilité pour les documents d'être inter communicables. Elle a eu l'idée d'attribuer pour chaque groupe un pourcentage de chance pour les documents d'être communicables ou non. Le chercheur a récupéré des règles de prédiction, c'est-à-dire des

⁸⁷ « Traitements de conservation » : au sens large, préventive, curative et numérisation.

⁸⁸ « Événements de communication » : quand les documents sortent des magasins.

⁸⁹ VALLAS (Philippe), « Prédire l'état matériel des documents : Dalgocol, un programme de recherche en intelligence artificielle à la BnF », *Bulletin des Bibliothèques de France*, 15 juin 2022. URL :<https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2022-00-0000-008>. Consulté le 5 août 2024.

algorithmes qu'il a testés pour voir quelles règles de prédiction donnaient les meilleurs résultats dans leur cas.

La troisième année a donc consisté à faire des prédictions à blanc. L'équipe a sélectionné 702 documents qui n'avaient pas d'état de communicabilité. Elle a répertorié si les documents étaient communicables ou non, avant de les soumettre, avec toutes leurs données, (sans la communicabilité qu'ils avaient établie) aux algorithmes du programme. Le résultat fut très prometteur : sur 702 documents, 654 ont été correctement classés comme communicables ou non communicables.

Ce travail, au-delà de l'aspect innovant de l'utilisation de l'intelligence artificielle, a mis en lumière différentes problématiques :

- Pour que l'utilisation de l'IA soit pertinente il faut travailler sur la qualité des données : seulement 5% de la collection totale est suffisamment bien renseignée pour pouvoir mener à bien ce genre de traitements - sachant que ces 5 % sont celles dont ils connaissaient déjà l'état de conservation.
- Pour l'avenir, ils envisagent d'ajouter des données utiles et de mener de nouvelles règles de prédiction, de calculer de nouvelles trajectoires en ajoutant des données comme l'acidification du document.
- Ils réfléchissent aussi notamment à la possibilité de repérer par les fouilles d'images en entraînant l'IA sur des dégradations de documents photographiés.

Ce projet a mis en évidence plusieurs points sur lesquels nous reviendrons en troisième partie de cette étude :

- des données pertinentes, propres, et existantes sont nécessaires pour que l'IA fonctionne car elle ne peut pas, contrairement à l'intelligence humaine, supposer ce qui n'existe pas. Il faut un nombre suffisant de données pertinentes au sein d'un même groupe.
- De la même façon, contrairement à l'intelligence humaine, certains rapports entre les données lui sont impossibles à comprendre, il y a donc un gros travail sur l'ontologie de ces mêmes données et leurs liens entre elles à mener.
- Enfin, pour que ce travail soit le plus utile possible, il faut le mener en pensant au futur et à l'interopérabilité des données notamment en exprimant l'ontologie en RDF⁹⁰ dans la visée de pouvoir un jour la partager et la mettre en ligne.

Selon Philippe Vallas⁹¹, chargé de mission au département des services de conservation de la BnF, la principale conclusion à tirer de ce projet réside dans le manque de données disponibles pour permettre à l'IA de fonctionner le plus efficacement possible : si les collections sont décrites du point de vue intellectuel, les descriptions physiques sont très lacunaires et les dégradations ne sont pas toujours indiquées. La coordination informatique du département de la Conservation a donc lancé, en association avec la direction des Collections, un travail de sensibilisation et d'homogénéisation des règles de description physique des différents types de documents, afin d'entraîner la systématisation de la production de ces « données utiles à la

⁹⁰ Resource Description Framework (RDF) est un modèle de graphe destiné à décrire formellement les ressources Web et leurs métadonnées, afin de permettre le traitement automatique de ces descriptions.

⁹¹ VALLAS (Philippe), « Prédire l'état matériel des documents : Dalgocol, un programme de recherche en intelligence artificielle à la BnF », *Bulletin des Bibliothèques de France*, 15 juin 2022. URL :<https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2022-00-0000-008>. Consulté le 5 août 2024.

conservation ». Cet effort devrait considérablement faciliter le travail des agents pour la gestion de la conservation pérenne des collections.

B. La recherche iconographique

Après avoir exposé les possibilités qu'ouvre l'intelligence artificielle en termes d'aide pour la conservation, il semblait pertinent d'exposer un cas de support à la recherche en histoire de l'art. La numérisation de grandes bases de données de photographies d'œuvres d'art ouvre des perspectives inédites de recherche dans ce domaine. Ces bases de données se veulent de plus en plus accessibles, enrichies d'œuvres de différentes provenances. Pour les historiens de l'art dont les recherches consistent souvent à identifier et à regrouper des influences picturales, voire des similarités, ce flot inédit de données entraîne à la fois un océan de possibilités et une tendance à l'enlisement face à un trop-plein d'informations. L'accès à de colossales bases de données d'images est une vraie richesse, mais sans moyen pertinent d'interroger ces données, la masse peut noyer des informations.

Les progrès de l'intelligence artificielle dans le traitement des grands corpus d'images ont permis l'émergence de nouveaux projets en lien avec les collections patrimoniales au service des historiens de l'art. Le projet « Replica » fut l'un des tous premiers en 2015. Dirigé par la chercheuse Isabelle di Leonardo, Il est né grâce au soutien de la fondation Giorgio Chini⁹² à Venise et il est mené conjointement avec l'École fédérale polytechnique de Lausanne.

Un rapide retour en arrière s'impose : dans les années 2010, Isabella di Leonardo, docteure en histoire de l'art, effectue des recherches sur la migration des motifs vénitiens vers le nord de la Flandre et des Pays-Bas. Elle travaille sur les influences et les répercussions de l'art vénitien. Elle a accès à la collection de la fondation Chini qui dénombre environ un million d'images. Cette collection porte notamment sur le patrimoine iconographique de Venise et de l'Italie en général, sur l'histoire de Venise, sur le patrimoine bâti, les ornements, les partitions musicales.... C'est un ensemble riche et varié. Isabella di Leonardo s'aperçoit bientôt qu'elle retrouve dans la collection de photographies, des personnages similaires d'une reproduction de tableau à l'autre. Elle se demande alors comment naviguer dans un corpus aussi riche de documents variés, avec des angles de perception et d'analyses divers. Elle est très intéressée par la possibilité d'effectuer des recherches dans un grand corpus d'images, non seulement avec des mots de vocabulaire, mais aussi en essayant de trouver des motifs similaires sur les photographies. Le projet « Replica » est né. En utilisant les techniques d'apprentissage profond, le *deep learning*, que nous avons évoqué en première partie, l'équipe du projet s'est plongée dans la problématique de faire reconnaître à l'intelligence artificielle des motifs visuels similaires.

La première étape du projet a consisté à numériser. Sur un million de documents, seulement 10 000 avaient déjà été répertoriés et numérisés. Il fallait donc trouver un moyen de numériser

⁹² « Fondazione Giorgio Cini Onlus – Il sito della Fondazione Giorgio Cini. L'offerta culturale, gli eventi, le biblioteche, le visite guidate. », [s.d.]. URL : <https://www.cini.it/>. Consulté le 2 septembre 2024.

rapidement différents formats de documents, souvent recto-verso, sans un nombre d'années trop important dédiées à cette tâche⁹³.

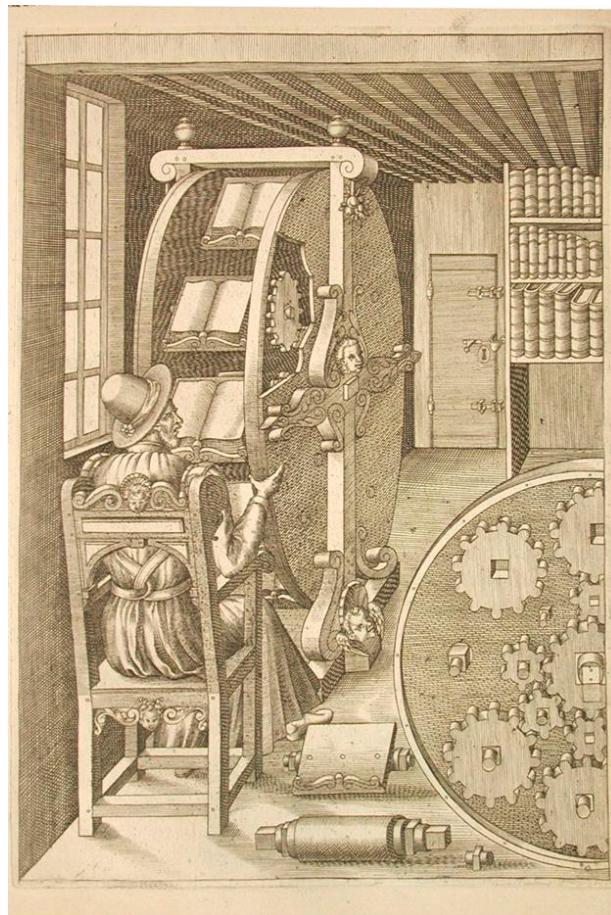


Fig. 23, Idée de mécanisme pour optimiser la lecture. Source : extrait de l'ouvrage *Le diverse et artificiose macchine* d'Agostino Ramelli, 1588.

L'équipe du projet s'est inspirée d'une illustration de l'ouvrage d'Agostino Ramelli en 1588 *Le diverse et artificiose macchine*. C'est un ouvrage d'ingénierie utopique proposant des machines dans les domaines de la construction, de la mécanique, de l'hydraulique, mais aussi des machines pour optimiser la lecture de manuscrits (Fig. 23). Cette idée de mécanisme qui pourrait tourner et optimiser l'efficacité de la lecture et de l'apprentissage a donné une idée à l'équipe. Ils ont conçu une machine qui tourne et qui est capable de numériser des formats différents avec une haute résolution, de capturer des images recto-verso et qui, automatiquement, peut générer des fichiers XML qui stockent les informations brutes des documents scannés. Ils sont parvenus à 350 000 numérisations recto-verso en un an (Fig. 24).

⁹³ École nationale des chartes - PSL, Journée de l'Ademec : « IA et institutions patrimoniales », *Chercher dans les grands corpus d'images à travers l'IA*, 29 janvier 2020. URL : https://www.youtube.com/watch?v=ndT3NLPeQFM&list=PLayqwLSo_nPW1wHnVwgJPwMya4gYBPe0&index=3. Consulté le 5 août 2024.



Fig. 24, Démonstration de l'utilisation du scanner Réplica. Source : Art tribune, en ligne : <https://www.arttribune.com/tribnews/2016/02/lo-scanner-piu-veloce-al-mondo-a-venezia-presentato-alla-fondazione-cini-il-rivoluzionario-replica-360rv-che-digitalizzea-lintera-fototeca-dellistituto-di-storia-dellarte/>. Consulté le 2 septembre 2024.

La deuxième étape du projet consistait à extraire le contenu de ces images. Il fallait entraîner les algorithmes à segmenter les pages des documents et à bien reconnaître ces documents, apprendre à l'algorithme à distinguer un carton, d'une image, de notes superposées *etc.*

Le problème de la segmentation de la page était novateur à l'époque et a demandé beaucoup d'études⁹⁴. Benoit Seguin, chercheur et informaticien, a créé un code, toujours ouvert sur Github, qui permet de faire toutes les opérations de segmentation. Il est ainsi possible de séparer puis de labelliser les éléments en entraînant la machine à reconnaître le contenu des documents. Comme nous allons le voir dans la partie suivante, c'est le même processus qui a été utilisé par la Bibliothèque apostolique vaticane. Il a été possible de travailler en collaboration avec la BnF pour faire des séances d'entraînement sur certaines collections de Gallica. Les résultats de l'application de la segmentation à d'autres collections que la fondation Chini ont été très performants⁹⁵.

La troisième étape a consisté, une fois les documents segmentés, à en extraire les métadonnées. L'équipe a utilisé comme procédé informatique l'océrisation, la reconnaissance des caractères pour traduire des images de textes en fichiers de texte. Ils ont ensuite labellisé à la main le

⁹⁴ Institut national d'histoire de l'art, #LundisNum | 8 janvier 2018 - Isabella Di Lenardo et Benoit Seguin : projet Replica, 9 janvier 2018. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=JxFMEAokjTM>. Consulté le 5 août 2024.

⁹⁵École nationale des chartes - PSL, Journée de l'Ademec : « IA et institutions patrimoniales », *Chercher dans les grands corpus d'images à travers l'IA*, 29 janvier 2020. URL : https://www.youtube.com/watch?v=ndT3NLPeQFM&list=PLayqwLSo_nPW1wHnVwgJPwMya4gYBPe0&index=3. Consulté le 5 août 2024.

contenu en indiquant l'emplacement et les différents éléments qu'ils voulaient voir apparaître : auteur, institution, description. Comme nous allons le décrire dans la partie suivante, ce fut également l'un des enjeux du projet de la BAV. En effet cet ajustement à la main entraîne son lot de questions comme la typologie de métadonnées à associer à chaque objet⁹⁶. C'est grâce à cet ajustement manuel, à la correction de l'intelligence humaine, que la machine peut apprendre et se renouveler. En effet, en utilisant l'océrisation, quelques métadonnées présentent des défauts dus à des lettres relevées en désordre par la machine ou à des problèmes d'orthographe⁹⁷. De plus, l'IA est freinée dans sa progression à cause de l'état de l'art du vocabulaire disponible en ligne. Si l'on prend l'exemple des noms d'artistes, la Getty Union List⁹⁸ est à ce jour la liste la plus complète de noms d'artistes. Mais l'équipe de « Replica » n'a pas réussi à aligner beaucoup de noms trouvés par océrisation dans les documents de la fondation avec cette liste pour plusieurs raisons : soit parce que les noms ne figuraient pas dans la liste, soit parce qu'ils étaient inconnus, soit parce que l'orthographe du nom n'était pas le même, ou encore parce qu'ils ne correspondaient à rien avec des appellations comme « maître de... » ou « Anonyme du XVI^e siècle ». C'est le propre de l'histoire de l'art de ne pas connaître tous les auteurs des tableaux et de travailler à l'authentification des œuvres, mais cela complique la tâche de l'IA.

L'intelligence artificielle a permis le développement de deux manières différentes pour chercher dans la collection : d'une part, en cherchant des métadonnées similaires, d'autre part en cherchant des motifs visuels similaires.

Pour ce qui est des métadonnées, 88 000 images ont au moins un double, pour un total de 34 000 objets. Cela signifie que 34 000 images représentent la même chose. La Joconde par exemple est en plusieurs exemplaires. L'algorithme a, de plus, du mal à percevoir de légères différences sur un tableau voire une restauration du même tableau. Cela reste un outil précieux pour mettre en parallèle des documents qui ne l'auraient pas été sinon. Les chercheurs ont par exemple lancé une recherche sur Botticelli et la machine a donné quatre fois ce qu'elle pensait être la même œuvre de Botticelli alors que les quatre images ont des détails différents. C'est au conservateur d'analyser ces éléments et d'essayer de comprendre pourquoi ils évoluent sur les peintures. Cela permet d'analyser de nouveaux corpus et éléments que les historiens n'auraient pu sortir à la main parmi 1 million d'images dispersées dans des tiroirs et rarement indexées.

Il arrive également que certains documents présentent des métadonnées qui ne sont pas cohérentes pour des raisons historiques. Au fil du temps, les conservateurs et les historiens ont donné des attributions différentes à certaines œuvres, soit parce que les attributions ont changé, soit parce que des erreurs humaines ont eu lieu dans le processus d'attribution d'un lieu ou d'une date. Ces évolutions dans l'identification d'œuvres et de leur récit font partie intégrante de la discipline en histoire de l'art, et constituent un sujet d'étude fécond pour les chercheurs, qui selon leurs propres formations et découvertes varient d'un spécialiste à l'autre.

Pour ce qui est de la recherche par motifs visuels similaires, l'équipe a conçu un *morphograph*, c'est-à-dire que la machine a été entraînée à reconnaître des similarités visuelles avec une

⁹⁶ Voir III, 1), C. Les limites de la « découverbarilité ».

⁹⁷ On parle d'une marge minime de 3% sur 700 000 docs.

⁹⁸ « Getty Union List of Artist Names (Research at the Getty) », [s.d.]. URL : <https://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/ulan>. Consulté le 2 septembre 2024.

hiérarchie de ressemblance. Le plus difficile a été de l'entraîner pour qu'elle repère des similitudes mais conserve une invariance de style, de couleurs, de postures, pour qu'elle puisse repérer, malgré de grandes différences, des similitudes.

Le *morpho graph* s'utilise avec une barre de recherche où il est possible de taper une thématique ou le nom d'un personnage. Il est possible de préciser la recherche, voire de soustraire des critères. L'apport du *morpho graph* est d'émettre des parallèles entre des images qui n'auraient jamais eu lieu sinon. Si Léda, le personnage de la mythologie grecque, est tapée dans la barre de recherche, le *morpho graph* donne des représentations de Léda (Fig. 25 et 26) mais aussi du personnage de Lucretia (Fig. 27) voire de Cléopâtre (Fig. 28) qui prennent la même posture. Il est très intéressant pour les historiens d'étudier ces rapprochements, qui n'existaient pas sans cet outil. L'IA amène donc de nouvelles hypothèses de recherches dans ces grands corpus iconographiques.



Fig. 25, Représentation de Léda. Source : Conférence sur le projet Réplica à l'INHA, en ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=JxFMEAokjTM>. Consulté le 2 septembre 2024.



Fig. 26, Représentation de Léda. Source : Conférence sur le projet Réplica à l'INHA, en ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=JxFMEAokjTM>. Consulté le 2 septembre 2024.



Fig. 27, Représentation de Lucretia. Source : Conférence sur le projet Réplica à l'INHA, en ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=JxFMEAokjTM>. Consulté le 2 septembre 2024.



Fig. 28, Représentation de Cléopâtre. Source : Conférence sur le projet Réplica à l'INHA, en ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=JxFMEAokjTM>. Consulté le 2 septembre 2024.

Un autre exemple des possibilités qu'elle offre est l'entraînement de la machine à reconnaître par similarité visuelle des lieux de Venise. Les images ont été labellisées avec les noms des lieux représentés et on peut ainsi replacer géographiquement les images selon ce qu'elles illustrent, de façon automatique. Il suffit d'associer une base de données des lieux cartographiques aux labels des lieux qui sont dans la collection d'images de la fondation. L'IA offre de nouvelles possibilités de complémenter les recherches en ligne : en effectuant une recherche textuelle sur la place Saint-Marc, on ne trouvera pas les mêmes points de vue que si on lance une recherche pour retrouver des motifs similaires de la place Saint-Marc dans les tableaux de Canaletto. On peut également choisir un détail en particulier pendant les recherches, un motif spécifique, et regarder la propagation de ce motif dans la collection. L'exemple de la place Saint-Marc est un exemple orienté qui fonctionne particulièrement bien car la fondation possède énormément de clichés de cet endroit mais avec un data set encore plus élargi⁹⁹, il serait sans doute possible de tisser encore plus de liens iconographiques sur la thématique de la place Saint-Marc.

Pour conclure, les conservateurs disposent désormais d'un inventaire de toute la collection grâce à l'extraction des métadonnées avec un grand document CSV et petit à petit, ils le reprennent pour le corriger. Ils parviennent désormais à étudier à l'aide de la recherche textuelle et de la recherche par image. Ce projet peut être très intéressant pour les citoyens également, pour un public plus élargi que celui des chercheurs auxquels le projet était adressé en premier. Le public intéressé par l'offre de visite en réalité virtuelle proposée à la galerie d'histoire de Saint-Marc, proposant de redécouvrir la place Saint-Marc et ses monuments au Moyen Âge, peut sûrement trouver l'offre iconographique de « Replica » complémentaire.

⁹⁹ Institut national d'histoire de l'art, « L'Atlas Mnemosyne », 4 décembre 2012. URL : <https://www.inha.fr/fr/ressources/publications/collections-imprimees/collection-sources-pour-l-histoire-de-l-art/l-atlas-mnemosyne.html>. Consulté le 12 août 2024.

Il pourrait par exemple être très intéressant d'utiliser l'œuvre de Aby Warburg, Mnemosyne, un immense corpus d'images, qui avait pour ambition de poser les fondements d'une grammaire figurative générale. L'œuvre est restée inachevée à la mort de son auteur, mais elle reste l'un des plus conséquents corpus jamais réunis.

C. La restauration

Dans notre choix d'exemples d'utilisation de l'intelligence artificielle sur des collections patrimoniales, il semblait pertinent de citer l'exemple d'une discipline telle que l'histoire de l'art. L'un des enjeux principaux de la recherche en histoire de l'art réside dans la restauration d'œuvres disparues ou vouées à disparaître, dont l'exemple le plus connu est peut-être le célèbre tableau de Géricault *Le Radeau de la Méduse* voué à s'assombrir comme d'autres tableaux de la même époque. Ce problème de conservation est dû à un pigment instable et très en vogue chez les artistes de la première moitié du XIX^e siècle, le noir de Judée ou noir de bitume. Issu d'une matière hydrocarbure solide ou huileuse, ce pigment était extrait de la mer Morte puis mélangé à chaud avec un liant, souvent de l'huile de lin, pour pouvoir être utilisé en peinture. Les peintres s'en servaient pour réaliser des ombres sur leurs toiles ou pour apporter une patine vieillie à leur tableau. Ce pigment particulièrement foncé, s'est répandu dans les couches de peinture du tableau, et n'a jamais séché¹⁰⁰. Il assombrit peu à peu la toile de manière irrémédiable (Fig. 29).



Fig. 29, Géricault, Le Radeau de la Méduse. Source : Musée du Louvre, en ligne : <https://collections.louvre.fr/ark:/53355/cl010059199>. Consulté le 2 septembre 2024.

Les événements de l'histoire ont influencé la conservation ou la destruction d'œuvres diverses et variées : la célèbre *Ronde de nuit* de Rembrandt, achevée en 1642, chef d'œuvre du

¹⁰⁰ PERESAN-ROUDIL (Delphine), « Le noir de Judée : coupable de l'assombrissement du "Radeau de la Méduse" ? », *Beaux-Arts*, 3 janvier 2024. URL : <https://www.beauxarts.com/grand-format/le-noir-de-bitume-coupable-de-l-assombrissement-du-radeau-de-la-meduse/>. Consulté le 2 septembre 2024.

Rijksmuseum d'Amsterdam aujourd'hui, a vu les quatre côtés de sa toile découpés et rabotés pour pouvoir être installée dans l'hôtel de ville d'Amsterdam en 1715¹⁰¹. Ces quatre morceaux de toile n'ont jamais été retrouvés.

Les exemples de pertes d'œuvres d'art sont légion et depuis quelques années, scientifiques et restaurateurs unissent leurs efforts pour tenter de sauver ou retrouver ce patrimoine menacé.

En 2021, le Rijksmuseum a réussi le pari de reconstituer *La Ronde de Nuit* dans son intégralité, à l'aide de l'intelligence artificielle¹⁰². L'équipe du musée s'est appuyée sur l'œuvre attribuée à Gerrit Lundens (1622-1686) et exécutée vers 1642-1655, qui montrait la composition originale du tableau de Rembrandt. Après avoir analysé les techniques picturales et l'utilisation de la couleur du peintre, l'équipe a utilisé des réseaux neuronaux artificiels pour recréer les parties manquantes du tableau en imitant Rembrandt. Les morceaux reconstitués par l'intelligence artificielle ont ensuite été imprimés sur toile, vernis et replacés autour de l'œuvre originale. La reconstitution est allée jusqu'à copier les fissures observables à la surface de la toile.

Comme le résume Pieter Roelofs, responsable du département des peintures et sculptures au Rijksmuseum : « Chaque génération a essayé de reconstruire le tableau selon les moyens et la technologie à sa disposition. Nous le faisons à notre tour en profitant des techniques les plus avancées actuellement disponibles»¹⁰³.

¹⁰¹ HAKOUN (Agathe), « Découpée il y a 300 ans, La Ronde de nuit de Rembrandt reconstituée grâce à l'intelligence artificielle », *Connaissance des Arts*, 25 juin 2021. URL : <https://www.connaissancesdesarts.com/musees/rijksmuseum/dcoupee-il-y-a-300-ans-la-ronde-de-nuit-de-rembrandt-reconstituee-grace-a-lintelligence-artificielle-11159499/> Consulté le 2 septembre 2024.

¹⁰² BOTTCHER (Sophie), « Voir l'invisible : l'intelligence artificielle au service de la restauration d'œuvres d'arts », *Contrepoints*, 24 juin 2024. URL : <https://mastersts.hypotheses.org/10892>. Consulté le 5 août 2024.

¹⁰³ HAKOUN (Agathe), « Découpée il y a 300 ans, La Ronde de nuit de Rembrandt reconstituée grâce à l'intelligence artificielle », *Connaissance des Arts*, 25 juin 2021. URL : <https://www.connaissancesdesarts.com/musees/rijksmuseum/dcoupee-il-y-a-300-ans-la-ronde-de-nuit-de-rembrandt-reconstituee-grace-a-lintelligence-artificielle-11159499/> Consulté le 2 septembre 2024.



Fig. 30, Rembrandt, La Ronde de Nuit. Source : Rijksmuseum, en ligne: <https://www.rts.ch/info/culture/12324756-lart-de-la-realite-augmentee-ou-des-booktubeuses-pour-un-ete-culturel.html>. Consulté le 2 septembre 2024.

Cette reconstitution permet désormais aux historiens de l'art d'avancer dans leurs recherches. L'ajout temporaire des parties reconstituées du tableau (Fig. 30) met en lumière le dynamisme de la composition et donne un aperçu différent de la construction et du mouvement au sein de l'œuvre : les deux personnages principaux, Frans Banning Cocq et son lieutenant Willem van Ruytenburch, précédemment au centre, sont décalés sur le côté de l'œuvre tandis que trois nouveaux personnages apparaissent sur un pont, deux arquebusiers et un jeune garçon. L'examen de l'œuvre dans sa composition initiale permet aux chercheurs de la remettre à sa place dans l'ensemble dans lequel elle s'inscrivait à l'origine et de comparer son traitement à celui d'autres toiles exécutées à la même période.

L'usage de l'intelligence artificielle ouvre la voie à plusieurs possibilités : la restauration comme nous venons de l'évoquer ou encore des découvertes inédites. Les archéologues qui, comme nous l'avions évoqué en première partie, ont vu les humanités numériques bouleverser leurs pratiques professionnelles, font de plus en plus appel aux nouvelles technologies pour tenter de lever certaines hypothèses dans leurs recherches.

Le Vesuvius challenge¹⁰⁴, lancé en 2015, est une compétition mondiale dont l'objectif est de réussir par l'application des techniques d'apprentissage automatique à déchiffrer les textes d'Herculaneum. Suite à l'éruption du Vésuve en 79 après J.-C., les manuscrits de la bibliothèque d'Herculaneum ont été carbonisés par la chaleur et les gaz, et réduits à l'état de masses compactes, fragiles et inutilisables (Fig. 31). En 1752, des ouvriers qui creusaient dans la cité antique ont découvert environ 1800 rouleaux de papyrus. Les rouleaux conservés depuis

¹⁰⁴ « Vesuvius Challenge », [s.d.]. URL : <https://scrollprize.org..> Consulté le 2 septembre 2024.

ont été laissés dans des réserves et considérés comme des objets de curiosité, plus représentatifs de la catastrophe de l'éruption volcanique qu'intellectuellement pertinents de par leur contenu illisible.



Fig. 31, Rouleau calciné d'Herculaneum. Source : Actualité, en ligne : <https://actualitte.com/article/113896/livres-anciens/indiana-jones-une-machine-dechiffre-un-rouleau-calcine>. Consulté le 2 septembre 2024.

Le professeur Brent Seales, de l'université du Kentucky aux Etats-Unis et toute son équipe, ont travaillé à déchiffrer ces textes en minimisant leur manipulation. Ils avaient préalablement réussi à produire des parchemins anciens en 3D en développant un logiciel qui permet de « dérouler numériquement » les images 3D afin de les transformer en segments aplatis. Grâce à cette prouesse technologique, ils étaient déjà parvenus à déchiffrer en 2015 un texte jusqu-là dissimulé dans le rouleau d'Ein Gedi, un rouleau carbonisé et fragmenté du Moyen-Orient datant du III^e ou IV^e siècle ap. J.-C.

Quand les chercheurs ont tenté d'appliquer cette même technique au déchiffrage des parchemins carbonisés, ils se sont heurtés à une nouvelle difficulté. Le rouleau d'Ein Gedi était fabriqué à partir d'encre métallique, c'est pourquoi les lettres étaient visibles sur le scanner. En revanche, les textes des parchemins d'Herculaneum ont été rédigés à l'aide d'une encre carbonée, ce qui, pour les rayons X, rend les symboles du papyrus indiscernables.

Les scientifiques se sont alors interrogés sur la possibilité de réaliser des scans à plus grande résolution des parchemins, à l'aide d'un accélérateur de particules, afin de donner un aperçu encore plus précis du papyrus carbonisé. Avec une résolution extrêmement élevée, les scans ont mis en évidence des zones visibles où l'encre avait légèrement altéré la forme et la texture des fibres du papyrus. Selon Seales, l'encre à base de carbone remplit de manière invisible les trous qui forment la grille du papyrus, les recouvre et les rend légèrement plus épais. Par la suite, le

scientifique et ses collaborateurs ont développé et entraîné un modèle d'apprentissage automatique pour repérer ces subtiles différences sur les surfaces carbonisées de papyrus. Afin de progresser dans ses recherches, Seales a décidé d'utiliser l'intelligence collective des scientifiques du monde entier, appuyé par des investisseurs de la Silicon Valley. C'est ainsi qu'est né le Vesuvius Challenge, qui a permis à trois participants, Luke Farritor, Youssef Nader et Julian Schilliger, de déchiffrer quatre passages distincts de 140 caractères chacun du papyrus¹⁰⁵.

D'après les premiers éléments déchiffrés sur le papyrus, notamment un passage présentant une réflexion sur l'influence que peut avoir l'abondance ou la pénurie sur des sources de plaisir comme la musique ou la nourriture, les chercheurs pensent que le scribe du texte était Philodème de Gadara, disciple du philosophe grec Épicure, pour qui le plaisir dépassait toutes les autres valeurs. L'auteur critique également ses adversaires, probablement les stoïciens, qui n'ont « rien à dire sur le plaisir, ni en général ni en particulier quand il s'agit de le définir »¹⁰⁶.

Grâce au succès de la compétition et au travail acharné de milliers de scientifiques passionnés, le modèle d'apprentissage automatique devrait continuer à s'améliorer et à révéler d'autres lettres jusqu'à ce qu'idéalement, les chercheurs soient en mesure de déchiffrer tous les papyrus d'Herculaneum. Cette réussite pourrait ouvrir la voie à de nouvelles fouilles archéologiques, les historiens soupçonnant que d'autres parchemins sont encore enfouis dans la cité antique.

Mais les possibilités de l'intelligence artificielle ne s'arrêtent pas à la restauration : les progrès de l'intelligence artificielle générative permettent de reconstituer des œuvres qui n'ont jamais existé sous leur forme finale ce qui pose quelques problèmes de déontologie.

À Paris, du 22 au 25 février 2024¹⁰⁷, se déroulait la foire internationale d'*Art Intelligence Artificielle deeep™*. Les visiteurs ont pu découvrir pendant quatre jours plus de 100 artistes clés en intelligence artificielle. Parmi ces artistes, la *start up* Oxias Palus créée en 2019 par deux chercheurs de l'*University College of London*, le spécialiste en apprentissage automatique et neurosciences Anthony Bourached et le physicien George Cann. Cette *start up* travaille sur un projet appelé *NeoMasters* qui s'emploie à recréer par l'utilisation de l'intelligence artificielle des tableaux disparus, consumés dans des incendies, cachés sous une autre couche de peinture ou égarés. La compagnie tire son nom de la région Oxia Palus située sur Mars et qui selon les scientifiques pourraient avoir un intérêt important pour la recherche de vie extra-terrestre sous la surface de la planète. Dans le même esprit, les deux fondateurs souhaitaient partir « à la recherche d'autres vies sous la surface des tableaux »¹⁰⁸.

Le premier tableau de ce projet est la *Miséreuse Accroupie* de Pablo Picasso, réalisée en 1902, une peinture inspirée par des lignes déjà tracées sur la toile par le peintre Santiago Rusinol. L'existence de cette œuvre imperceptible et cachée, a été supposée avec le temps par l'apparition de craquelures sur le tableau de Picasso.

¹⁰⁵ OURY (Antoine), « IndIAna Jones ? Une machine déchiffre un rouleau calciné », *ActuaLitté.com*, [s.d.]. URL : <https://actualitte.com/article/113896/livres-anciens/indiana-jones-une-machine-dechiffre-un-rouleau-calcine>. Consulté le 5 août 2024.

¹⁰⁶ *Ibid.*

¹⁰⁷ BOTTCHER (Sophie), « Voir l'invisible : l'intelligence artificielle au service de la restauration d'œuvres d'arts », *ContrepoinTs*, 24 juin 2024. URL : <https://mastersts.hypotheses.org/10892>. Consulté le 5 août 2024.

¹⁰⁸ *Ibid.*

C'est ainsi que *Parc del Laberint d'Horta* a été dévoilé au grand jour par l'imagerie à fluorescence X et l'intelligence artificielle¹⁰⁹ (Fig. 32 et 33).



Fig. 32, Picasso, *Miséreuse Accroupie* et sous la toile, Rusinol, *Parc del Laberint d'Horta*.
Source : Research Gate, en ligne : https://www.researchgate.net/figure/a-Visible-image-of-La-Misereuse-accroupie-1902-Pablo-Picasso-Oil-on-canvas_fig3_343106084. Consulté le 2 septembre 2024.

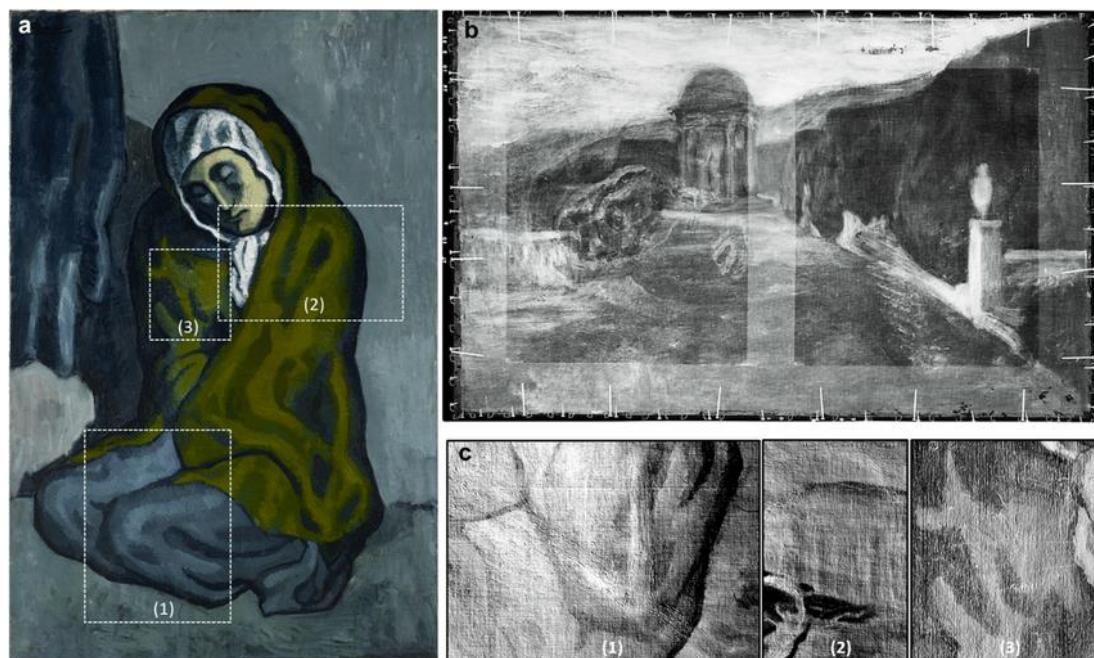


Fig. 33, Picasso, *Miséreuse Accroupie* et sous la toile, Rusinol, *Parc del Laberint d'Horta*.
Source : Research Gate, en ligne : https://www.researchgate.net/figure/a-Visible-image-of-La-Misereuse-accroupie-1902-Pablo-Picasso-Oil-on-canvas_fig3_343106084. Consulté le 2 septembre 2024.

¹⁰⁹ *Ibid.*

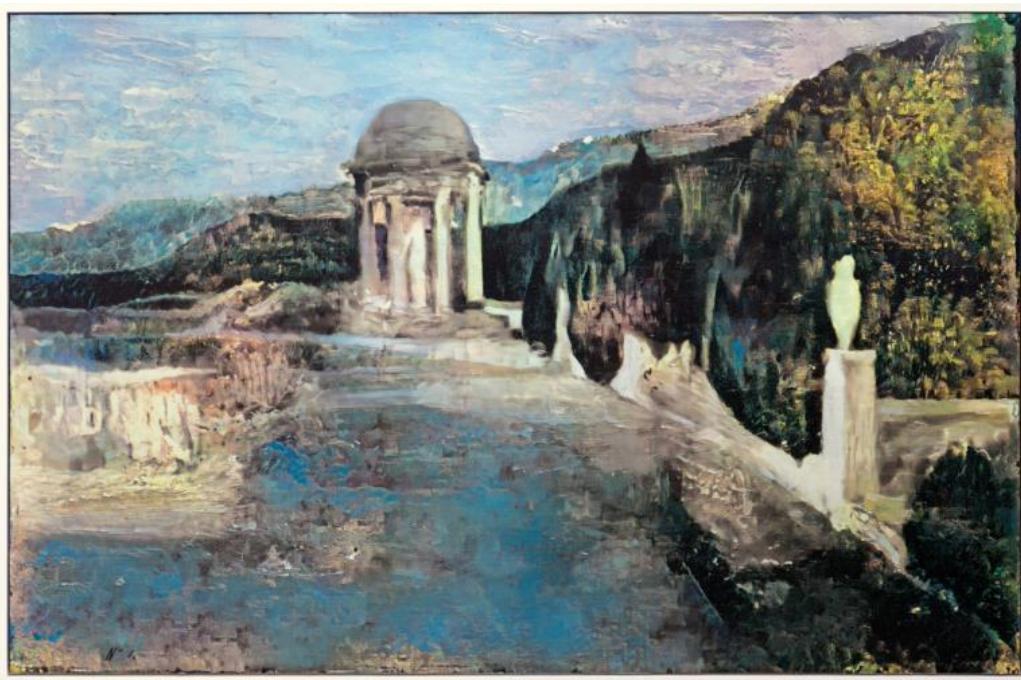


Fig. 34, Impression de la toile de Rusinol, Parc del Laberint d'Horta. Source : BOTTCHER (Sophie), « Voir l'invisible : l'intelligence artificielle au service de la restauration d'œuvres d'arts », en ligne : <https://mastersts.hypotheses.org/10892>. Consulté le 2 septembre 2024.

Le processus de redécouverte et d'édition de ces toiles-sous-les-toiles commence par le tri entre les tracés des peintures superposées. Les vues en rayons X donnant des images confuses et flous, les chercheurs retirent à la main, sur les images numérisées, les éléments dont ils sont certains qu'ils ne peuvent être présents sur la peinture cachée. Ils utilisent aussi des algorithmes entraînés sur d'autres œuvres du peintre concerné pour parfaire et compléter le tracé des contours de la scène à ressusciter. La nouvelle image ainsi obtenue est une sorte de dessin à colorier. Les chercheurs de l'université de Tübingen en Allemagne ont développé des algorithmes de transfert de style neuronal pour analyser les rayons X fantômes d'œuvres d'art surpeintes. L'ordinateur peut ensuite générer une version en couleur de la composition perdue en s'inspirant des œuvres connues de l'artiste¹¹⁰.

Oxia Palus a généré des images en couleur de vingt peintures perdues, précédemment vues uniquement par rayons X. L'étape suivante consiste à utiliser la technologie d'impression 3D pour produire des toiles texturées des peintures perdues avec des coups de pinceau réalistes (Fig. 34 et 35).

¹¹⁰ CASCONE (Sarah) « A Neuroscientist and a Physicist Used A.I. to Recreate a Lost Painting Buried Under a Beloved Picasso Canvas », *Artnet News*, 8 avril 2021. URL : <https://news.artnet.com/art-world/lost-painting-under-picasso-masterpiece-recreated-as-an-nft-1957407>. Consulté le 2 septembre 2024.

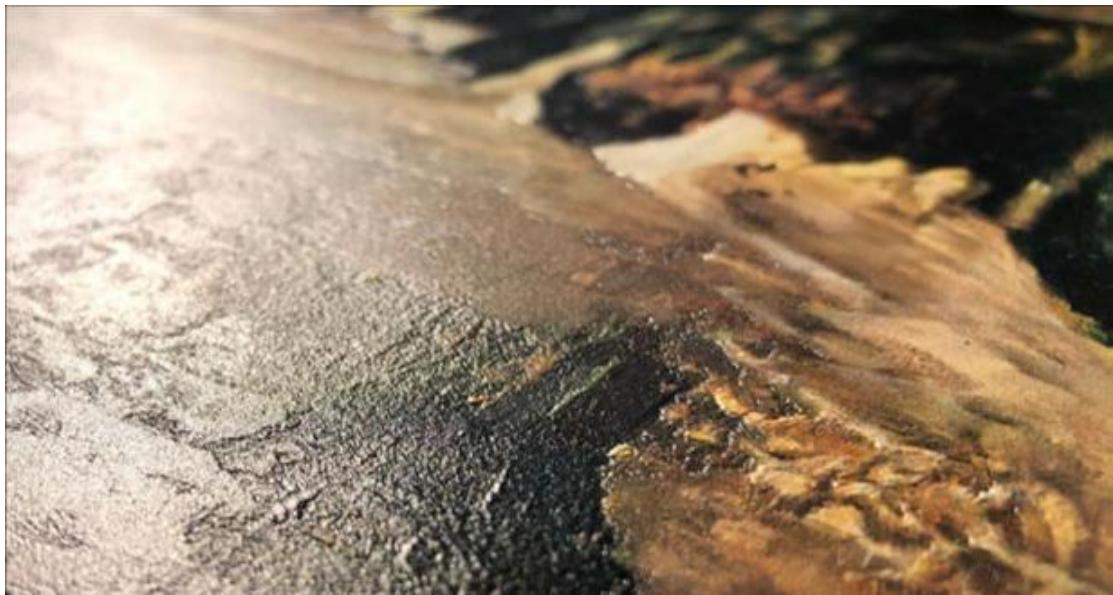


Fig. 35, L'Impression en 3D, utilisée pour le projet Oxia Palus. Source :Agenda Culturel, en ligne : <https://www.agendaculturel.com/articles/oxia-palus-une-promesse-davenir-pour-les-vestiges-du-passe>. Consulté le 2 septembre 2024.

La volonté initiale d’Oxia Palus de trouver d’autres œuvres et d’autres histoires sous la surface des tableaux était scientifiquement et intellectuellement compréhensible et pertinente. Mais face à l’impression 3D des tableaux ainsi créés et à leur vente pour plusieurs milliers d’euros chacun, cette procédure soulève de nombreux questionnements : quelle valeur ont ces tableaux ? Quelle authenticité peut-on leur donner ? Quelle propriété intellectuelle ? Qu’en aurait pensé l’artiste ? Cette finalité lucrative s’oppose à l’essence même de la restauration d’art, qui sert à contribuer à l’accessibilité et à la redécouverte des œuvres¹¹¹.

¹¹¹ BOTTCHER (Sophie), « Voir l’invisible : l’intelligence artificielle au service de la restauration d’œuvres d’arts », *Contrepoints*, 24 juin 2024. URL : <https://mastersts.hypotheses.org/10892>. Consulté le 5 août 2024.

III/ Quels enjeux pour les institutions culturelles face à l'IA ?

1) L'IA, une promesse d'accessibilité ?

A. Comment l'IA modifie les institutions culturelles et leurs services

Nous avons pu voir jusqu'ici que l'intelligence artificielle est en train de devenir un support important à la recherche et un outil pertinent pour les chercheurs y compris dans le cadre de l'iconographie et des images. De plus en plus nombreux sont les musées tel que le Musée des Arts décoratifs¹¹² qui créent des positions de chef de projet en intelligence artificielle afin de produire de nouveaux dispositifs de navigation de leurs collections iconographiques conséquentes, pour leurs chercheurs. Tout comme les musées, les bibliothèques tentent de se mettre au diapason de ces nouvelles technologies.

Cette prise de conscience est illustrée par la déclaration de la Fédération Internationale des Associations et Institutions de Bibliothèque (IFLA) en 2022 sur les bibliothèques et l'intelligence artificielle. Selon cette déclaration, les technologies de l'intelligence artificielle pourraient favoriser de multiples changements dans le domaine de la bibliothèque : « Améliorer la reconnaissance optique des caractères des textes, explorer de nouvelles utilisations des collections de bibliothèques lisibles par machine, développer de nouvelles approches pour gérer les connaissances dans les bibliothèques, tels que l'organisation, le stockage et l'intégration des métadonnées ».

Les bibliothèques et les associations de bibliothèques pourraient par ailleurs interagir avec les chercheurs et les développeurs d'IA afin de concevoir des applications spécifiquement conçues pour les bibliothèques et répondant aux besoins des utilisateurs, notamment en proposant des services accessibles qui n'étaient pas encore disponibles. Les bibliothécaires auraient également la possibilité d'accompagner leurs usagers dans l'acquisition de compétences en culture numérique, c'est-à-dire la capacité d'utiliser la technologie de manière éclairée, que ce soient des compétences informatiques de base ou des capacités créatives, dans le respect de l'éthique et en toute légalité. Même dans le projet de la Vaticane, centré sur les animaux, nous avons pu constater que l'IA était subjective. Elle a identifié les personnes japonaises des manuscrits comme étant des oursons en peluche (Fig. 36). On le sait, l'IA peut faire apparaître des biais à toutes les étapes du processus¹¹³. Il est donc important d'accompagner les usagers dans la découverte de cet outil.

¹¹² Marion Charpier est actuellement cheffe de projet en intelligence artificielle au MAD.

¹¹³ Bibliothèque nationale de France, « Enjeux juridiques et éthiques / AI & GLAM collections: legal & ethical challenges to sharing GLAMs collections », [s.d.]. URL : <https://www.bnf.fr/fr/mediatheque/enjeux-juridiques-et-ethiques-ai-glam-collections-legal-ethical-challenges-sharing..> Consulté le 2 septembre 2024

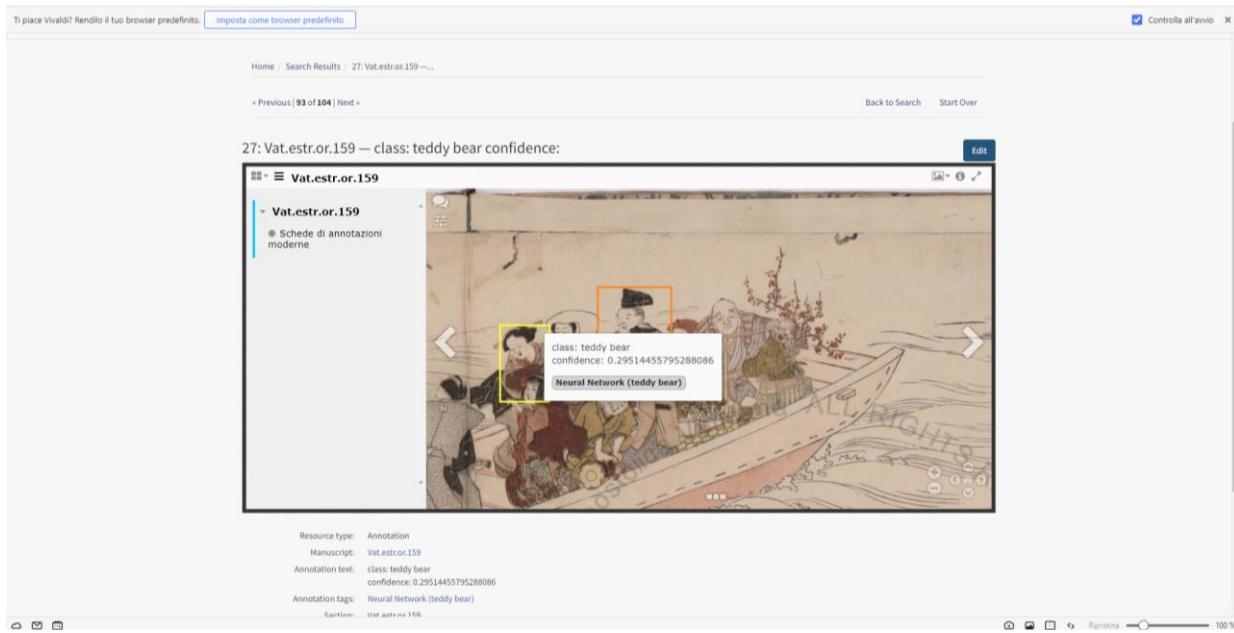


Fig. 36, Vat. estr. Or. 159, Identification d'oursons en peluche par l'IA au lieu de personnes japonaises. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

En accompagnant leurs utilisateurs dans leur compréhension de l'IA, les bibliothèques pourraient ainsi leur offrir la possibilité de contribuer aux débats politiques sur les utilisations éthiques et souhaitables de l'IA pour le public.

Afin d'illustrer cette transition, deux sondages rapides ont été menés auprès des membres de l'Association of Research Libraries (ARL) au Canada et aux Etats-Unis¹¹⁴.

Le premier sondage, réalisé en avril 2023, a fourni un premier aperçu du paysage de l'IA dans les bibliothèques. Le second sondage, réalisé en décembre 2023, a poursuivi cette enquête en offrant une perspective comparative sur l'évolution de la dynamique de l'utilisation et des possibilités de l'IA dans les services de bibliothèque. Cette étude cherche à saisir l'évolution des perspectives sur l'impact potentiel de l'IA, à évaluer l'étendue de l'exploration et de la mise en œuvre de l'IA dans les bibliothèques et à identifier les applications de l'IA pertinentes pour l'environnement actuel des bibliothèques. Les enseignements tirés de cette analyse comparative éclairent le rôle des bibliothèques dans une ère de plus en plus axée sur l'IA, en fournissant des orientations stratégiques et en mettant en évidence les pratiques des bibliothèques de recherche.

Les demandes ayant reçu le plus de mentions sont notamment liées :

- Au catalogage automatisé et à la gestion des métadonnées (35 mentions), ce qui témoigne d'un intérêt pour les possibilités qu'offrirait l'IA pour améliorer la gestion et l'accessibilité des ressources.

¹¹⁴ LO (Leo S.) et VITALE (Cynthia Hudson), *Evolving AI Strategies in Libraries: Insights from Two Polls of ARL Member Representatives over Nine Months*, 28 mars 2024. URL : <https://www.arl.org/resources/evolving-ai-strategies-in-libraries-insights-from-two-polls-of-arl-member-representatives-over-nine-months/>. Consulté le 2 septembre 2024.

- Aux *chatbots*¹¹⁵ pour l'assistance aux utilisateurs (35 mentions), ce qui indique un espoir d'amélioration de l'accessibilité et de la qualité de service par l'intermédiaire d'une interaction directe avec l'IA.
- A l'enseignement de la recherche assistée par l'IA (31 mentions), ce qui démontre l'envie d'intégration de l'IA dans les services et les méthodes d'aide à la recherche, en renforçant le rôle de la bibliothèque dans l'autonomisation des chercheurs.

Selon les représentants des membres de l'ARL¹¹⁶, l'IA générative risque d'exercer une influence importante à long terme sur les activités et les prestations des bibliothèques. Selon eux, l'intelligence artificielle permettra de simplifier les opérations, d'améliorer la productivité et de redéfinir le personnel des bibliothèques. Toutefois, ils admettent également l'importance de prendre en compte les défis potentiels tels que des outils d'intelligence artificielle développés par des vendeurs sans l'intervention de la bibliothèque¹¹⁷. Les aspects éthiques, tels que le développement et l'utilisation responsables de l'IA, demeurent également une préoccupation majeure pour les bibliothèques.

Comme une grande partie de la profession de bibliothécaire, les bibliothèques d'art et leurs bibliothécaires repensent leur rôle dans le contexte de l'ère numérique. Dans une étude de la Kress Foundation¹¹⁸ parue il y a une dizaine d'années, les bibliothécaires d'art évoquaient déjà de nouvelles manières de promouvoir un engagement numérique plus important dans leur domaine. Ils voulaient en particulier être des intermédiaires entre les chercheurs et les ingénieurs pour soutenir la recherche numérique, former à l'histoire de l'art numérique, offrir des services de numérisation, intégrer l'art et les performances numériques dans les collections et jouer un rôle dans la conservation des fonds numériques. Les changements qui affectent désormais les bibliothèques avec l'arrivée d'outils comme l'IA sont autant de pistes de réflexions pour mener à bien ces objectifs.

A la BnF, ces questionnements se sont posés il y a plusieurs années avec notamment la rédaction d'une feuille de route autour de l'IA par Emmanuelle Bermès en 2019¹¹⁹.

Par ailleurs, l'article « L'image comme particule élémentaire, ou les prémisses d'un changement d'échelle à la BnF »¹²⁰ illustre de nouvelles approches¹²¹ face à l'enjeu de faire

¹¹⁵ Un *chatbot* ou agent conversationnel est un logiciel qui peut répondre aux questions des usagers.

¹¹⁶ LO (Leo S.) et VITALE (Cynthia Hudson), *Evolving AI Strategies in Libraries: Insights from Two Polls of ARL Member Representatives over Nine Months*, 28 mars 2024. URL : <https://www.arl.org/resources/evolving-ai-strategies-in-libraries-insights-from-two-polls-of-arl-member-representatives-over-nine-months/>. Consulté le 2 septembre 2024.

¹¹⁷ LECLAIRE (Céline), « Les futurs Fantastiques », 3 février 2022. URL : https://bbf.enssib.fr/tour-d-horizon/les-futurs-fantastiques_70324. Consulté le 31 août 2024.

¹¹⁸ « Transitioning to a Digital World: Art History, Its Research Centers, and Digital Scholarship | Samuel H. Kress Foundation », [s.d.]. URL : <https://www.kressfoundation.org/Resources/Sponsored-Research/Research-Items/Transitioning-to-a-Digital-World>. Consulté le 12 août 2024.

¹¹⁹ BERMES (Emmanuelle) et LECLAIRE (Céline), « Vers l'intelligence artificielle et au-delà ! Une feuille de route pour la BnF », *Arabesques*, n° 107 (octobre 2022), p. 8-9. URL : <https://publications-prairial.fr/arabesques/index.php?id=3082..> Consulté le 3 août 2024.

¹²⁰ BERMES (Emmanuelle), LECLAIRE (Céline), MOREUX (Jean-Philippe), « L'image comme particule élémentaire, ou les prémisses d'un changement d'échelle à la BnF », *The Measurement of Images. Computational Approaches in the History and Theory of the Arts*, sous la direction de Clarisse Bardot et Emmanuel Château-Dutier, Presses universitaires du Septentrion, A paraître, Humanités numériques et science ouverte. URL : <https://hal.science/hal-03991515/document> Consulté le 28 août 2024.

¹²¹ *Ibid.*

profiter à tous les publics de nouvelles fonctionnalités de recherche dans les collections, sans sous-estimer les changements méthodologiques que soulèvent ces dernières ni les risques de biais. L'article souligne l'importance d'un nouveau type de médiation, qui ne se concentre pas uniquement sur les contenus, mais qui vise à mettre en perspective les méthodes de recherche par algorithme, tout en préservant l'art de la recherche avec discernement. Le projet « GallicaSnoop » se voulait une réponse possible à ces enjeux, en émettant l'idée d'impliquer l'utilisateur dans sa relation avec la machine. Dans le cadre de ce projet, une interface a été développée afin de réaliser des recherches d'images dans un corpus spécifique en affinant progressivement le modèle, en « indiquant » à la machine les résultats satisfaisants et les résultats non satisfaisants.

Par ailleurs, le travail effectué par la BnF sur la plateforme Mandragore ouvre des pistes intéressantes de réflexion pour le projet de la Vaticane et son approche¹²².

La plateforme Mandragore est l'une des plus anciennes plateformes en ligne de la BnF. Ayant été conçue en 1989, les formats des numérisations présentes sont par conséquent divers. À l'époque, on numérisait par lots d'images. Le site a été entièrement remanié en 2022 et les premiers résultats de consultation sont analysés. Alexandre Tur, conservateur chargé de collections au service des manuscrits médiévaux, nous avait expliqué qu'un soin particulier a été dévolu aux outils de recherche sur la nouvelle mouture du site. Le mode « exploration » de la base par exemple est une nouveauté qui permet d'apporter un contenu de recherche plus visuel, avec beaucoup plus d'utilisation de mots clefs pour les sujets.

L'équipe voudrait rendre le site -pour le moment alphabétique- thématique et apporter une aide contextuelle supplémentaire. Ils songent également à émettre de nouveaux critères de recherches, de nouveaux filtres tels qu'un filtre par couleurs.

D'après les premiers retours de consultations, les usagers ne sont pas forcément amateurs du mode « exploration », il a été constaté qu'ils utilisent en priorité l'option de la barre de recherche avec une ligne parce qu'ils sont plus familiers avec ce système.

Mandragore reste avant tout une plateforme consultée par les chercheurs bien qu'utilisée par les professions des métiers d'art au sens large, les restaurateurs, les enlumineurs. Il est encore trop tôt pour évaluer si l'évolution du site internet a influencé leurs pratiques de recherches. Néanmoins, d'autres réflexions émergent : le mode « exploration » avait été conçu pour plaire au grand public, avec un aperçu très visuel, en mosaïque, des collections. Ce sont finalement les chercheurs qui plébiscitent le plus ce mode de recherche dans les fonds iconographiques car ils sont très intéressés par la possibilité d'avoir un ensemble visuel des fonds¹²³.

Un autre enjeu que pose le développement de Mandragore se trouve dans la recherche sémantique par vocabulaire. En changeant de site, l'équipe a mis à jour les données du thésaurus et a implanté le multilinguisme. Malheureusement, elle s'est retrouvée face à plusieurs problèmes qui ont contrecarré la possibilité d'interopérabilité de la plateforme. Ils n'utilisent pas les mêmes classes ni les mêmes normes que l'IRHT. Les mots clefs utilisés sur les images dans les recherches sont les mêmes mots clefs qui servent de classes pour l'identification des

¹²² « Bases de données iconographiques et l'intelligence artificielle | Canal U », 24 mai 2023. URL : <https://www.canal-u.tv/chaines/enc/bases-de-donnees-iconographiques-et-l-intelligence-artificielle>. Consulté le 3 août 2024.

¹²³ Propos d'Alexandre Tur.

animaux sur les enluminures et ils ne fonctionnent que sur Mandragore et pas sur Gallica. Il y a eu beaucoup d'hésitations sur les appellations à attribuer pour que les chercheurs parviennent à trouver des résultats pertinents en faisant leurs recherches. Cette évolution du site a fait émerger de nombreuses questions sur la pérennisation des données et sur l'enjeu d'uniformisation avec les métadonnées Gallica. La BnF souhaiterait par exemple pouvoir développer les liens entre Mandragore et Gallica, signaler les manuscrits de Gallica décrits dans Mandragore par exemple. Un objectif à long terme, enrichissant pour les recherches, serait de relier les notices de catalogues de Gallica avec les manuscrits Mandragore¹²⁴.

Ces questions d'interopérabilité se sont également posées pour le projet « Gallica Images ». De nombreuses discussions ont porté sur l'uniformisation d'un vocabulaire utilisé pour cette technologie sur le patrimoine, un vocabulaire technique et patrimonial codifié que pourraient comprendre à la fois les chercheurs en sciences humaines et les techniciens.

Yves Citton, lors de la rencontre des « Futurs Fantastiques » en 2021¹²⁵ a ainsi rappelé qu'une problématique derrière l'IA n'était pas tant l'automatisation des procédures mais l'envergure des échelles internationales qui allaient être impactées par ce changement: Les opérations intellectuelles des bibliothèques sont-elles les mêmes à Paris et à Mumbai ? Les logiciels sont-ils homogénéisés ? Qui concourt à cette homogénéisation ?

Le principal enjeu, résumé par Mike Keller, directeur des bibliothèques de l'Université de Stanford, qui semble se dessiner est le suivant : « Mieux comprendre les contenus dont nous sommes dépositaires et mieux les relier à d'autres »¹²⁶.

Comment la Vaticane a-t-elle répondu à ces préoccupations d'interopérabilité pour son projet ?

B. Interopérabilité et standard IIIF

L'un des enjeux majeurs de ce projet est l'interopérabilité des données produites pour le mener à bien. C'est un questionnement qui est revenu régulièrement dans le cadre du stage dont découle ce mémoire, stage international mené par une étudiante française dans une bibliothèque vaticane en Italie soutenue par une fondation américaine. Rapidement, la question de l'interopérabilité de ce projet est donc devenue omniprésente.

Le concept d'interopérabilité est crucial pour rendre les projets numériques accessibles internationalement, ce qui implique des défis, notamment en ce qui concerne les normes d'appellation dans le domaine de la codicologie et des manuscrits.

¹²⁴ *Ibid.*

¹²⁵ LECLAIRE (Céline), « Les futurs Fantastiques », 3 février 2022. URL : https://bbf.enssib.fr/tour-d-horizon/les-futurs-fantastiques_70324. Consulté le 31 août 2024.

¹²⁶ LECLAIRE (Céline), « Les futurs Fantastiques », 3 février 2022. URL : https://bbf.enssib.fr/tour-d-horizon/les-futurs-fantastiques_70324. Consulté le 31 août 2024.

Depuis 2002, la Vaticane a mis en place un projet de conversion rétrospective des catalogues et inventaires de ses fonds papiers, en utilisant la norme *Text Encoding Initiative*¹²⁷ (TEI) pour le catalogage électronique des manuscrits.

La TEI¹²⁸ se concentre sur ce qui est commun à tous les types de documents, qu'ils soient représentés physiquement sous forme numérique, sous forme imprimée ou sous forme écrite. Cette continuité permet de faire passer le texte de formes plus anciennes, tel que le manuscrit, à d'autres plus récentes, tel que l'écran.

La TEI permet de réfléchir à la nature du texte : elle est une sorte d'encyclopédie de concepts textuels. Les documents TEI numériques sont aujourd'hui écrits à l'aide d'un langage d'encodage formel très répandu, l'*Extensible Markup Language* (XML), publié pour la première fois en 1998 par le *World Wide Web Consortium* (W3C), mais ayant ses racines dans les systèmes de préparation des documents des années 1980. Le XML permet une représentation facile de données structurées par l'intermédiaire notamment de « balises » pour indiquer des éléments sémantiques ou une structure dans un texte.

La BAV a mis en œuvre des projets de numérisation dans une double optique de stockage à long terme et de création d'une bibliothèque numérique accessible via le Web. Les manuscrits sont décrits avec le logiciel « InForMA » en format METS en langage TEI.

Le format *Metadata Encoding and Transmission Standard* (METS) a été créé par la *Digital Library Foundation* en 2001 et maintenu par la Bibliothèque du Congrès. Pour reprendre la définition de la BnF : « Il sert à exprimer des métadonnées de natures diverses portant sur un document numérique, dans le but de faciliter son échange, sa gestion et sa préservation »¹²⁹.

Le travail de description à la BAV se compose essentiellement de deux parties :

- D'une part, la description des métadonnées descriptives, pour la compilation d'éléments et de données codicologiques se rapportant au manuscrit dans son ensemble et d'autre part, la description du contenu du manuscrit.
- De plus, chaque document numérique accessible en ligne et décrit en format METS possède une *Uniform Resource Locator* (URL) persistante. Il est essentiel d'attribuer des identifiants uniques et pérennes aux entités que l'on décrit, peu importe leur nature, afin d'assurer une gestion efficace, une accessibilité et une réutilisabilité des données que l'on génère¹³⁰.

La description de chacun des manuscrits ainsi présentés figure comme complément d'information dans les expositions virtuelles de la plateforme « Spotlight »¹³¹. Chaque

¹²⁷ « Guidelines – TEI: Text Encoding Initiative », [s.d.]. URL : <https://tei-c.org/guidelines/>. Consulté le 12 août 2024.

¹²⁸ BURNARD (Lou), « La TEI et le XML », dans *Qu'est-ce que la Text Encoding Initiative ?*, Marseille, 2015 (Encyclopédie numérique). URL : <https://books.openedition.org/oep/1298>. Consulté le 12 août 2024. ISBN : 9782821855816.

¹²⁹ Bibliothèque nationale de France « METS : Metadata Encoding and Transmission Standard », [s.d.]. URL : <https://www.bnf.fr/fr/mets-metadata-encoding-and-transmission-standard>. Consulté le 2 septembre 2024.

¹³⁰ « Identifiants pérennes pour les ressources numériques », 11 décembre 2015. URL : <https://www.culture.gouv.fr/espace-documentation/Publications-revues/Identifiants-perennes-pour-les-ressources-numeriques>. Consulté le 12 août 2024.

¹³¹ Voir I/ 2) De l'acquisition à la numérisation des fonds de la Vaticane.

manuscrit possède ainsi ses métadonnées, librement accessibles. Elles permettent de décrire le document et d'apporter des éléments de recherches (Fig. 37).

INFORMAZIONI SUL MANOSCRITTO	
Resource type:	Manuscript
Collection:	Urb.lat.
Segnatura:	Urb.lat.1
Biblioteca:	Biblioteca Apostolica Vaticana
Altra denominazione:	Bibbia di Federico da Montefeltro and Bibbia urbinata
Datazione:	sec. XV ex
Datato:	25 febbraio 1477
Paese:	Italia
Località:	Firenze
Materiale:	membr.
Altezza:	598
Larghezza:	441
Numeri fogli:	II, 236, I
Contenuto:	Bibbia sacra latine. Vetus Testamentum cum prologis et argumentis s. Hieronymi et aliorum.
Exhibit Tags:	Bibbia Francesco di Antonio del Chierico Francesco Rosselli Attavante degli Attavanti Maestro del Senofonte Hamilton Domenico Ghirlandaio David Ghirlandaio antiporta miniata Iniziali miniata

Fig. 37, Fig. 37, Urb. Lat. 1, métadonnées du manuscrit. Source : Spotlight, en ligne https://digi.vatlib.it/view/MSS_Urb.lat.1. Consulté le 3 septembre 2024.

Pour le projet « Mellon » ainsi que pour notre projet d'intelligence artificielle, la BAV est allée encore plus loin dans sa démarche d'interopérabilité en utilisant la technologie *International Image Interoperability Framework* (IIIF).

En effet, Isabelle Westeel, dans son article intitulé « Données, corpus numérisés et humanités numériques » d'avril 2013¹³², mentionnait la multitude de ressources numériques disponibles en ligne et se demandait comment elles influençaient la recherche. Elle y avait clairement mis en évidence la question de l'interopérabilité, tout comme la visualisation, l'accessibilité et la valorisation de ces contenus. L'initiative IIIF s'inscrit clairement dans ce domaine.

Malgré l'émergence de nombreux schémas et protocoles pour répondre aux besoins d'échange et d'agrégation de métadonnées, tel que le format METS mentionné précédemment, les images sont demeurées le parent pauvre de ces initiatives. Les institutions culturelles ou scientifiques impliquées dans la numérisation de documents ont souvent été confrontées à des difficultés pour leur numérisation, leur diffusion en ligne et leur entretien.

Les bibliothèques numériques se sont multipliées et chaque institution a développé ses propres outils pour rendre accessibles ses fonds avec des « visualiseurs » d'images, des outils d'annotation... Malgré un objectif souvent similaire, il était difficile pour les institutions de partager le fruit de leur travail, les outils développés n'étant pas interopérables tout comme les contenus numérisés. L'utilisateur devait s'adapter à chaque interface de consultation, chacune ayant ses fonctionnalités propres¹³³.

¹³² ROBINEAU (Régis), « Comprendre IIIF et l'interopérabilité des bibliothèques numériques », *Insula*, 8 novembre 2016. URL : <https://insula.univ-lille.fr/2016/11/08/comprendre-iiif-interoperabilite-bibliotheques-numeriques/>. Consulté le 12 août 2024.

¹³³ Portail Biblissima », IRHT - CNRS, [s.d.]. URL : <https://www.irht.cnrs.fr/fr/ressources/sites-web-outils-corpus/biblissima>. Consulté le 12 août 2024.

C'est à partir de cette observation qu'est apparu le besoin de standardisation, et donc de coopération, qui a donné naissance à l'initiative IIIF. C'est à ces questions que répondent les normes et les outils développés par cette communauté. Ce mouvement s'inscrit pleinement dans le virage du « modèle de mutualisation » que décrit Emmanuelle Bermès¹³⁴.

L'International Image Interoperability Framework est une technologie qui propose un ensemble de normes visant à établir un cadre d'interopérabilité pour les bibliothèques numériques. Ce standard a pour objectif de mettre en place un cadre technique commun permettant aux bibliothèques numériques de diffuser leurs contenus de manière standardisée sur le Web, de manière à ce qu'ils puissent être consultés, manipulés et annotés par toute application ou logiciel compatible¹³⁵.

Les bibliothèques nationales, les musées, les universités, les agrégateurs (Artstor, Europeana, DPLA) et les projets plus spécifiques (Biblissima, e-codices, TextGrid...) sont à l'origine de ce projet. Depuis juin 2015, une communauté internationale d'institutions scientifiques et patrimoniales s'est formée, représentant l'un des plus importants fournisseurs d'images numériques sur le Web. La communauté IIIF a pour mission principale de développer et de publier les spécifications techniques du standard qui sont ensuite mises en œuvre dans des logiciels et des plateformes (serveurs d'images, visualiseurs, outils d'annotation, systèmes de gestion de contenus, *etc.*), assurant ainsi leur interopérabilité¹³⁶.

Les normes IIIF permettent de développer le potentiel des contenus des bibliothèques numériques en encourageant leur intégration dans d'autres applications ou pour d'autres utilisations. Elles ouvrent différentes possibilités d'utilisation pour les usagers : elles permettent de mettre côte à côte plusieurs documents numérisés issus de bibliothèques différentes afin de les comparer ou de les annoter, de restituer l'état originel d'un document en regroupant virtuellement des fragments dispersés ou encore d'associer aux images des données produites par la recherche, tels que des transcriptions, des commentaires, du son, d'autres images¹³⁷. Il est possible de visualiser et zoomer sur des images en haute résolution, de manipuler une image à distance pour modifier son format, sa taille, sa rotation et de partager une image au moyen d'une URL stable. En outre, les annotations ont un grand potentiel pour enrichir et relier les contenus. Elles peuvent être utilisées au sein d'une institution pour améliorer les contenus à la source, comme rendre le moteur de recherche plus efficace : indexation manuelle ou automatisée du contenu des images, océrisation du texte, *etc.* Si les contenus sont librement accessibles sur Internet, toute personne peut également les annoter à l'extérieur de l'institution, pour ses propres besoins ou au profit de l'institution. Les possibilités sont diverses : créer un lien vers une autre ressource, transcrire ou traduire le texte, identifier une personne ou un lieu dans l'image, laisser une note ou un commentaire personnel, *etc.* Il est possible de rechercher en plein texte dans ces annotations pour trouver des thématiques.

¹³⁴ BERMES (Emmanuelle), « « L'évolution du modèle d'agrégation de données dans les bibliothèques numériques », *Figoblog*, 25 mars 2016. URL : <https://figoblog.org/2016/03/25/levolution-du-modele-daggregation/>. Consulté le 2 septembre 2024.

¹³⁵ ROBINEAU (Régis), « Introduction aux protocoles IIIF » (février 2019). URL : <https://zenodo.org/record/3760306..> Consulté le 2 septembre 2024.

¹³⁶ *Ibid.*

¹³⁷ ROBINEAU (Régis), « Introduction aux protocoles IIIF » (février 2019). URL : <https://zenodo.org/record/3760306..> Consulté le 2 septembre 2024.

Le standard IIIF établit un cadre technique basé sur divers protocoles ou API (Interface de Programmation Applicative). Elles constituent la base sur laquelle peut se développer un écosystème d'outils et de ressources numériques interopérables¹³⁸.

Les deux principales API utilisées pour IIIF sont l'API Image et l'API Présentation.

L'API Image propose un moyen de transmettre les pixels d'une image et de la manipuler à distance en utilisant une syntaxe d'URL standardisée. Ainsi l'usager peut manipuler l'image en fonction de différents paramètres tels que la région, la taille, la rotation, la qualité et le format. Il est ainsi possible de réduire la taille, de faire pivoter ou retourner l'image, de la transformer en noir et blanc... Cette API permet de fournir des métadonnées techniques sur une image (telles que les dimensions de l'image, des mentions de droits, et des informations de conformité pour leur utilisation).

L'API Présentation quant à elle spécifie les métadonnées (descriptives, structurelles, techniques) nécessaires à la présentation d'un artefact numérique dans une interface (par exemple un visualiseur d'images).

Toutes ces informations sont contenues dans un fichier appelé *manifest*, une sorte d'enveloppe virtuelle. C'est ce fichier que vont manipuler les logiciels le plus souvent pour interagir avec une ressource, la visualiser, ou la transférer vers un autre outil. Il est rédigé en format JSON (*JavaScript Object Notation*), un format d'échange qui décrit la représentation numérique d'un objet, sa structure interne, ses métadonnées, ses liens avec d'autres ressources, ses annotations.

Un *manifest* IIIF représente le fac-similé numérique d'un objet physique (livre, manuscrit, périodique, carte, peinture, photographie, partition, monnaie, objet archéologique, archive sonore, captation vidéo, etc.). Un *manifest*, par sa nature, peut aussi rassembler des séries d'images provenant de différentes collections.

Les visualiseurs IIIF tels que « Mirador » ou « Universal Viewer » font partie des outils capables d'afficher un objet via son *manifest* et de proposer à l'utilisateur une expérience de visualisation riche. La BAV utilise le visualiseur « Mirador » pour ses expositions virtuelles (Fig. 38).

¹³⁸ *Ibid.*

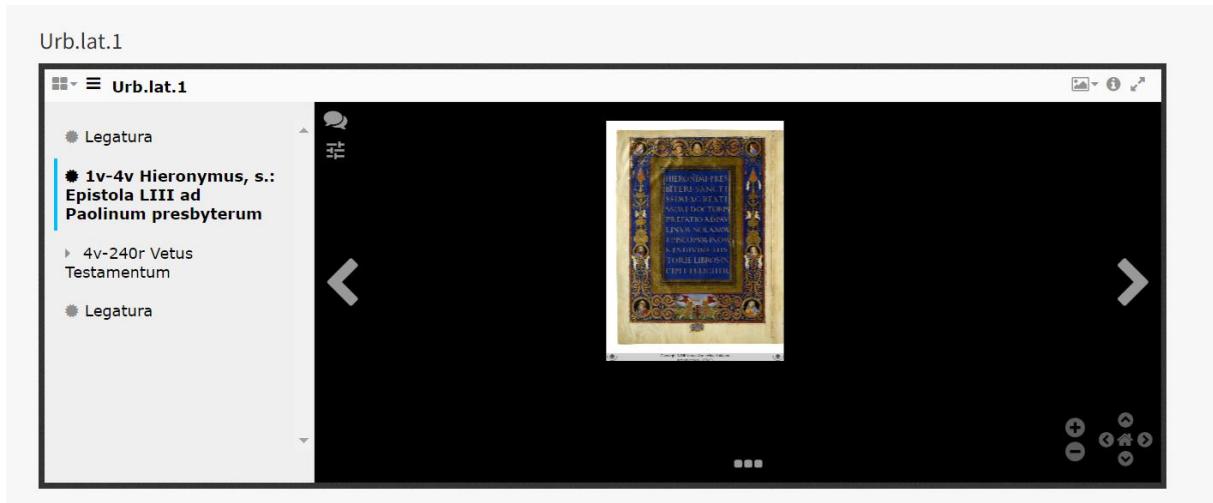


Fig. 38, Urb. Lat. 1, fenêtre Mirador avec des annotations sur le manuscrit. Source : Spotlight, en ligne : https://digi.vatlib.it/view/MSS_Urb.lat.1. Consulté le 2 septembre 2024.

Ainsi, les technologies IIIF offrent de nouvelles perspectives pour la mise en valeur du patrimoine culturel numérique et son utilisation dans le domaine de l'enseignement et de la recherche. En rendant accessibles de vastes corpus d'images et de ressources audiovisuelles, la technologie IIIF agit comme un facilitateur pour de nombreux projets et applications utilisant les collections des institutions culturelles et susceptibles de toucher des publics variés. C'est pourquoi la BAV a axé l'intégralité de son projet d'intelligence artificielle sur ce standard et sur la possibilité de produire des annotations automatiques en IIIF¹³⁹. Dans un contexte de numérisation de masse et de multiplication de l'accès aux sources en ligne, les pratiques numériques des chercheurs deviennent de plus en plus sophistiquées et cherchent à s'affranchir des barrières techniques entre les sites.

Le concept d'interopérabilité s'entend à la fois pour des métadonnées numériques mais aussi pour des données beaucoup plus matérielles. Le projet de la Vaticane a soulevé de nombreuses questions de normes d'appellation dans le domaine de la codicologie et des manuscrits.

La multiplication des thésaurus et des outils technologiques dans les systèmes de recherche d'information, a donné lieu à un accroissement des langages documentaires¹⁴⁰.

Or, dans les réseaux d'information contemporains, les problèmes liés à la multiplicité et à la diversité des langages de recherche sont devenus légion : Comment naviguer entre différentes possibilités de recherches, entre éléments annotés, thésaurus spécialisé, barre de recherche, souvent dans plusieurs langues différentes ?

Il existe différentes pistes pour travailler sur l'ontologie des termes se référant à la codicologie des manuscrits :

¹³⁹ ROBINEAU (Régis), *op. cit.*

¹⁴⁰ « IFLA Statement on Libraries and Artificial Intelligence », (Committee on Freedom of Access to Information and Freedom of), (octobre 2020). URL : <https://repository.ifla.org/handle/123456789/1646>. Consulté le 3 août 2024.

Le site Codicologie¹⁴¹ offre une source de vocabulaire multilingue précieuse pour décrire les manuscrits. Il est composé de trois bases de données :

- le *Vocabulaire codicologique* de Denis Muzerelle (de l'IRHT) avec un glossaire systématique des mots français liés aux manuscrits, suivis de leurs équivalents en anglais, italien, espagnol¹⁴²,
- l'*Édition et l'annotation des manuscrits hébreux, grecs, latins, romans et arabes* de Philippe Bobichon (IRHT),
- le *Glossaire de codicologique arabe* d'Anne-Marie Eddé (IRHT), Marc Geoffroy (LEM), Marie-Geneviève Guesdon (BnF), avec la collaboration de Youssef Baratli. Certains termes sont accompagnés d'explications ainsi que de sources iconographiques.

Une autre aide pour la terminologie est Libraria¹⁴³, le carnet consacré à l'histoire des bibliothèques anciennes, du haut Moyen Âge aux collections de l'époque moderne, et à la provenance des manuscrits médiévaux. Il s'inscrit dans la veille scientifique de l'équipe de codicologie, histoire des bibliothèques et héraldique de l'IRHT.

Ce lexique propose une liste alphabétique du vocabulaire attesté dans les documents anciens concernant les ouvrages et les bibliothèques. Chaque notice comporte le mot-vedette, ses formes variantes et les expressions qui s'y réfèrent. Ce travail illustre parfaitement la difficulté des normes de vocabulaire en codicologie. Si nous prenons l'exemple de la notice 183 « Illustrer » la signification donnée est la suivante : « Au XVII siècle : Imprimer, éditer, au sens de tirer de l'obscurité (sans aucun lien avec l'illustration au sens actuel du terme) ». Il n'existe pas moins de 37 expressions du mot *Littera* et de nombreuses expressions comme « les matines » (notice 245) ont un sens polysémique ou qui a évolué.

Ce projet a donc souligné différents enjeux quant au vocabulaire utilisé pour décrire les ouvrages et à l'obligation de traduction de ces termes. Comme nous l'avons vu, la technologie IIIF permet d'annoter soi-même des images, par l'indexation manuelle notamment comme cela a été le cas au cours de ce stage. Si les contenus sont librement accessibles sur Internet, toute personne peut les annoter à l'extérieur de l'institution, lui donner la terminologie de son choix et créer des liens vers d'autres ressources. L'indexation par l'utilisateur ("user tagging")¹⁴⁴ très développée dans les années 2000, est en train de revenir sur le devant de la scène. Des services d'indexation par les usagers sont mis en place dans les bibliothèques, largement inspirés des idées et des technologies de ce qu'on appelait le "Web 2.0". L'observation de l'adéquation entre l'indexeur-rechercheur et l'efficacité de la recherche a été prouvée et utilisée comme preuve de l'intérêt pour les chercheurs d'accéder à toutes sortes de vocabulaires contrôlés et structurés¹⁴⁵. Mais face à de tels problèmes de terminologie, un dispositif de cet acabit ne serait peut-être pas le plus pertinent à la BAV.

¹⁴¹ « Glossaires Codicologiques », [s.d.]. URL : <https://codicologia.irht.cnrs.fr/>. Consulté le 12 août 2024.

¹⁴² HECK (Christian) et CORDONNIER (Rémy), *Le bestiaire médiéval: l'animal dans les manuscrits enluminés*, Paris, Citadelles & Mazenod, 2018. 741.647 0902. ISBN : 9782850887239.

¹⁴³ MORARD (Martin), « Terminologie ancienne | Libraria », 25 août 2021. URL : <https://libraria.hypotheses.org/category/terminologie>. Consulté le 12 août 2024.

¹⁴⁴ FURNER (Jonathan), « User tagging of library resources: Toward a framework for system evaluation» University of California Los Angeles, Etats-Unis, 2007 https://www.researchgate.net/publication/238393988_User_tagging_of_library_resources_Toward_a_framework_for_system_evaluation. Consulté le 2 septembre 2024.

¹⁴⁵ *Ibid.*

C. Les limites de la « découvrabilité »

La découvrabilité est une notion qui regroupe à la fois la disponibilité d'une information et sa capacité à être repérée par une personne qui n'en faisait pas vraiment la recherche. La BnF a organisé une journée d'étude le 20 juin 2023¹⁴⁶ sur cette thématique à la suite d'une enquête menée auprès des publics de Gallica qui mettait en avant que 92% des usagers étaient satisfaits de la plateforme, mais seulement 25% utilisaient le moteur de recherche et 14% le trouvaient pertinent¹⁴⁷.

Face à la démocratisation des outils informatiques et à leur multiplication sous de nombreuses formes (numérisations, expositions virtuelles *etc*), les usagers peuvent se retrouver perdus devant l'ampleur des options proposées. Pour valoriser les projets numériques et leur permettre d'être utiles aux usagers, il faudrait les envisager de manière accessible et en adéquation aux comportements des utilisateurs en ligne.

Un des leviers d'action pour mieux connaître les outils proposés en ligne réside dans la mise en relation des données entre elles, en interopérabilité, comme nous l'avons décrit précédemment. Ces échanges de métadonnées doivent faciliter la navigation des personnes au sein des fonds.

Mais comment promouvoir ces contenus en restant pertinent ? Quels contenus suggérer ? L'irruption du moteur de recherche Google a, qui plus est, bouleversé nos pratiques en ligne. Les utilisateurs, habitués à une barre de recherche, s'orientent le plus souvent vers ce dispositif pour leurs recherches au détriment d'autres outils développés pour la prospection dans les collections. Pourtant, seules des notices bibliographiques aux bonnes normes et bien structurées garantissent de trouver des informations pertinentes avec cette pratique¹⁴⁸.

L'expérience d'*Europeana* a, de plus, montré qu'il restait bien des questions ouvertes avant que les moteurs de recherche puissent être considérés comme maîtrisés pour une bibliothèque numérique. La question du multilinguisme, dans le cas d'une bibliothèque européenne, reste entière : la multiplication des langues et en particulier la forte présence des langues anciennes, non prises en compte par les outils du marché, reste un défi¹⁴⁹.

Comme l'évoque Emmanuelle Bermes¹⁵⁰, l'outil du moteur de recherche au sein de la bibliothèque risque de nous amener probablement à repositionner une partie de nos outils et de nos pratiques. Comment générer de nouveaux modes de consultation qui pourraient permettre de s'éloigner du parcours tracé du moteur de recherches ?

¹⁴⁶ Bibliothèque nationale de France « Penser la découvrabilité des contenus culturels », 20 juin 2023. URL : <https://www.bnf.fr/fr/agenda/penser-la-decouvrabilite-des-contenus-culturels>. Consulté le 12 août 2024.

¹⁴⁷ « Comment penser la promotion de contenus culturels ? (1/2) », [s.d.]. URL : <https://www.810.fr/blog-posts/rex-bnf-decouvrabilite-contenus-culturels-1>. Consulté le 2 septembre 2024.

¹⁴⁸ « IFLA Statement on Libraries and Artificial Intelligence », (Committee on Freedom of Access to Information and Freedom of), (octobre 2020). URL : <https://repository.ifla.org/handle/123456789/1646>. Consulté le 3 août 2024.

¹⁴⁹ *Ibid.*

¹⁵⁰ BERMES (Emmanuelle), « Les moteurs de recherche : petit précis de mécanique à l'usage des bibliothèques numériques », Bulletin des bibliothèques de France (BBF), 2007, n°6, p. 5-10. URL : <https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2007-06-0005-001>. Consulté le 2 septembre 2024.

À la Vaticane, outre l'utilisation de formats d'encodage telle que la TEI¹⁵¹ précédemment évoquée, l'option retenue a été d'utiliser le standard IIIF et de produire des annotations à la main pour permettre aux usagers de renouveler leurs pratiques de recherches en ligne.

Malgré nos demandes, il n'a pas été possible d'avoir un chiffre exact du nombre de visiteurs sur la plateforme « Spotlight », ni de la nationalité de ces derniers. Néanmoins, nous avons constaté au cours du projet, différents choix pour renouveler les pratiques de recherches en ligne.

La plateforme numérique de la Vaticane offre un accès gratuit à ses collections numérisées. Elle repose entièrement sur le standard IIIF. Outre les possibilités techniques que nous avons déjà mentionnées, comme la visionneuse qui permet de zoomer et de tourner dans les pages, et les descriptions et références bibliographiques associées à chaque objet et à son manifeste en ligne, la bibliothèque a mis en place d'autres outils. Toutes les annotations sont indexées sur sa plateforme « Spotlight » avec les métadonnées correspondantes, ce qui forme un système sémantiquement enrichi qui permet aux chercheurs de rechercher intégralement tous les contenus disponibles d'une ressource.

Parmi les bénéfices du standard IIIF pour les manuscrits, le projet a montré comment les annotations pouvaient constituer une innovation essentielle dans l'étude des contenus avec de nouvelles possibilités de transcriptions, de commentaires, d'analyse comparative des textes et des images.

La Vaticane voulait attirer l'attention des usagers de son site web sur les possibilités d'utilisation des manuscrits annotés dans IIIF, selon des thèmes spécifiques, en fournissant des outils pour découvrir et comparer les matériaux numériques.

Un parcours thématique est composé comme nous l'avons vu en première partie de trois types d'informations :

- Une description générale (introduction, informations historiques, *etc.*) du thème choisi,
- Des métadonnées descriptives et structurelles ainsi qu'une explication scientifique pour chaque manuscrit,
- Des annotations, commentaires, analyses approfondies sur des parties détaillées d'un manuscrit (textes, commentaires, enluminures, *etc.*) et des transcriptions d'unités d'information IIIF.

Grâce à ces trois catégories d'informations, de grandes collections numériques ont été créées et regroupent des contenus répartis entre les différentes expositions virtuelles du site. Toutefois, afin de bénéficier des outils de recherche proposés par le standard IIIF, il est essentiel que l'utilisateur puisse les localiser. Récemment, le groupe communautaire IIIF *Discovery for Humans*¹⁵² a été fondé afin de satisfaire ces besoins. L'objectif de ce groupe est de dépasser le simple travail de spécification afin de favoriser des mises en œuvre impliquant des spécialistes de la recherche, du contenu, de l'expérience utilisateur et des métadonnées. Il soutient les

¹⁵¹ Voir II,1) B. Interopérabilité et standard IIIF

¹⁵² « IIIF Discovery Technical Specification Group », [s.d.]. URL : <https://iiif.io/community/groups/discovery/>. Consulté le 2 septembre 2024.

méthodes centrées sur l'utilisateur qui favorisent la découverte ciblée, au-delà des séparations institutionnelles et des domaines, des ressources IIIF.

Cela a contribué à une meilleure compréhension du contexte actuel de la recherche de ressources IIIF. La mesure des caractéristiques de découverte a constitué le premier élément essentiel de la planification des engagements du groupe et une première étape cruciale pour répondre à la question suivante « comment est-il possible de découvrir un contenu conforme au IIIF par le biais des plateformes web actuelles ? ».

L'utilisation des *folksonomies*, ou tags, est considérée comme une piste possible. Durant le stage, plus de 300 « tags » différents (des étiquettes), ont été apposés pour identifier les espèces d'animaux(Annexe ?). Ces étiquettes fournissaient comme informations le nom de la personne qui annotait à la main ou le CNN et le nom de l'espèce identifiée, traduite en anglais et en italien. Il était ensuite possible dans l'onglet de recherche de la plateforme de sélectionner directement le nom de l'espèce pour atteindre le manuscrit qui l'a représentée. Donc l'enjeu c'est trouver des tags adaptés qui permettent de faire des recherches croisées les plus complètes et exhaustives possibles, sans priver le chercheur et/ou le visiteur virtuel curieux, de découvrir d'autres collections. Mais comme nous l'avons souligné précédemment, face à la multiplicité des nuances de vocabulaire liées à la codicologie médiévale et au manque de connaissances d'un secteur aussi spécifique que les animaux médiévaux, la participation des usagers risque d'être scientifiquement peu pertinente et de comporter des erreurs. En revanche, cette participation peut permettre de redécouvrir des collections, de naviguer dans les fonds en se laissant guider par les étiquettes et de pouvoir trouver, à la faveur du hasard, des documents que l'on ne cherchait pas, un concept de plus en plus évoqué en sciences humaines sous le nom de sérendipité¹⁵³.

2) Le bestiaire et l'IA, fausse bonne idée ?

A. À la recherche des animaux dans les manuscrits pataux

Le premier public ciblé par la BAV pour ce nouveau projet était constitué majoritairement d'historiens de l'art dont les recherches pouvaient porter sur les représentations zoologiques ou l'histoire culturelle des animaux. Durant le stage dont découle ce mémoire, l'idée de mener une discussion avec certains de ces chercheurs pour leur demander leur avis sur la démarche du projet s'est peu à peu imposée.

Les avis de ces chercheurs furent particulièrement utiles et pertinents car ils soulignaient des problématiques scientifiques que le projet n'avait pas mis en lumière, ainsi que l'utilité de certaines erreurs techniques de l'entreprise. Certaines problématiques techniques soulevées par ce travail étaient en fait précieuses aux chercheurs tandis que d'autres choix d'édition qui avaient paru évidents à l'équipe de la BAV étaient faussés.

Pour Pierre-Olivier Dittmar, maître de conférence à l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS), la question des catégories d'animaux est centrale. En effet, comme l'évoque

¹⁵³ ERTZSCHEID (Olivier) et GALLEZOT (Gabriel) « Chercher faux et trouver juste : Serendipité et recherche d'information », 2003 URL : <https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/file/index/docid/62272/filename/index.html>. Consulté le 2 septembre 2024.

également Michel Pastoureau dans son ouvrage *L'historien face à l'animal*¹⁵⁴, il serait inutile, voire piégeux de tenter de calquer des catégories d'espèces de la science moderne aux bestiaires médiévaux¹⁵⁵. Comme l'explique Rémy Cordonnier, docteur en histoire de l'art médiéval et spécialiste de l'iconographie animale (en particulier des oiseaux), il se pose pour ce projet un véritable problème de représentation.

Jusqu'au XIIIème siècle, les représentations des animaux médiévaux dans les manuscrits ne sont que le reflet et le support d'une iconographie religieuse, spirituelle, qui dépasse l'animal. La forme animale est réduite à la plus simple expression iconographique et délivre des symboles, des éléments porteurs de sens comme dans la Bible¹⁵⁶. Les représentations et leurs descriptions s'il y en a, sont narratives et non descriptives, elles servent une iconographie abstraite qui s'appuie sur des éléments de comparaisons et sur un système de virtus.

Le pélican, par exemple n'est quasiment jamais représenté de manière naturaliste pour démontrer un quelconque aspect scientifique mais bien parce qu'au Moyen Âge, on pensait qu'il perçait ses flancs pour nourrir de sa propre chair ses petits. Il est donc devenu par excellence la métaphore du Christ et de l'Eucharistie. La population savait à quoi ressemblait un pélican mais la représentation d'un pélican dans un manuscrit servait à asseoir un propos métaphorique et non morphologique¹⁵⁷. Par ailleurs, dans *L'historien face à l'animal*, Michel Pastoureau expose que la représentation des animaux dépend aussi du contexte d'exécution de l'enluminure. Le cheval est représenté majoritairement avec une crinière épaisse, des oreilles et une queue relativement courtes tandis que l'âne est doté lui d'une crinière courte, mais de longues oreilles et queue. Modifier les caractéristiques du cheval en enlevant sa crinière ou en allongeant ses oreilles pour le faire ressembler à son condisciple l'âne, est en réalité une manière de dévaloriser la personne qui le monte, probablement un ennemi dans le récit. Ce type de notions précises et ambivalentes est impossible à percevoir pour l'IA (Fig. 39).

¹⁵⁴ « [...] Chercher à expliquer la zoologie médiévale en se fondant sur la zoologie moderne demande beaucoup de prudence ». p. 88, PASTOUREAU (Michel), *L'historien face à l'animal: l'exemple du Moyen Âge*, éd. École nationale des chartes, Paris, 2023.

¹⁵⁵ PASTOUREAU, *op. cit.* « Comme toujours au Moyen Âge, l'histoire culturelle prend le pas sur l'histoire naturelle » p. 81

¹⁵⁶ *Ibid.*

¹⁵⁷ Propos de Rémy Cordonnier

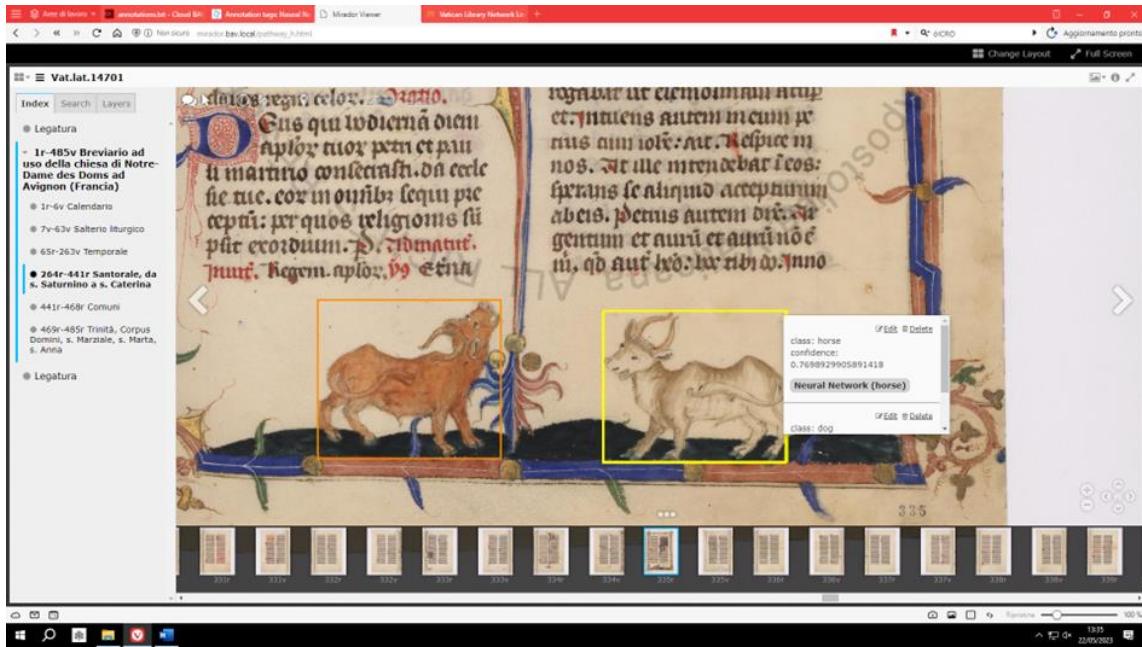


Fig. 39, Vat. lat. 14701, Folio 335 recto, l'IA a confondu des taureaux et des chevaux. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

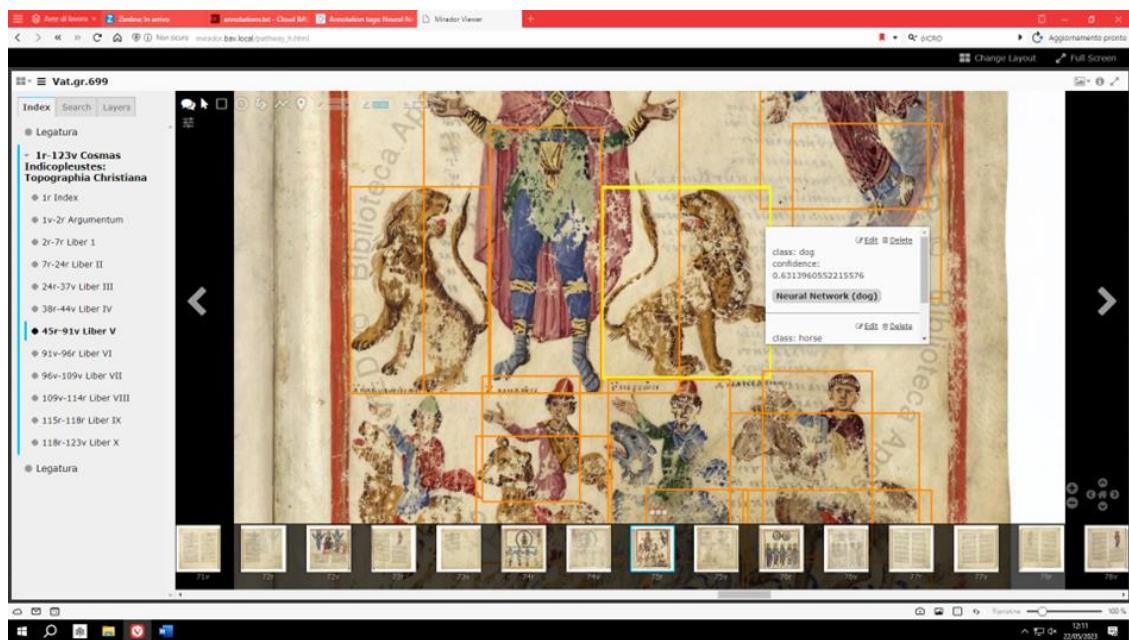


Fig. 40, Vat. gr. 699, Folio 75 recto, l'IA a pris des lions pour des chiens. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

C'est pourquoi l'intelligence artificielle qui identifie les espèces par des critères purement morphologiques est trompeuse. Pour Rémy Cordonnier, il faudrait songer à établir un schéma de description qui correspondrait à la manière dont les animaux étaient vus et représentés au Moyen Âge car utiliser une base de données de représentations naturalistes d'animaux modernes pour identifier des animaux médiévaux n'a aucun sens. Un lion au Moyen Âge est

identifié comme un lion car il a toujours les yeux ouverts, de grandes dents et de grands yeux mais pas toujours de crinière touffue, il n'est donc pas du tout représenté de la même manière d'un manuscrit à l'autre, y compris à la même époque (Fig. 40). L'identité à proprement parler des animaux n'est qu'un élément de base à l'analyse de leur représentation¹⁵⁸. Pierre-Olivier Dittmar le confirme, il y a toujours une part de symbolique dans la représentation zoologique médiévale. C'est pourquoi, selon lui, les catégories d'espèces sur le « Spotlight » doivent rester les plus vagues possibles pour avoir un panorama large des différences de représentations symboliques d'un même animal.

Selon Rémy Cordonnier, le contexte est primordial pour aider aux interprétations iconographiques. Une piste de réflexion qui s'est dégagée pour la suite du projet serait d'utiliser l'éventail de notices possibles sur « Spotlight » pour rajouter des éléments sur des thématiques comme l'hagiographie (thématique qui ne manque pas d'éléments iconographiques à la BAV) afin de faciliter les liens d'analyses iconographiques (Fig. 41)¹⁵⁹.

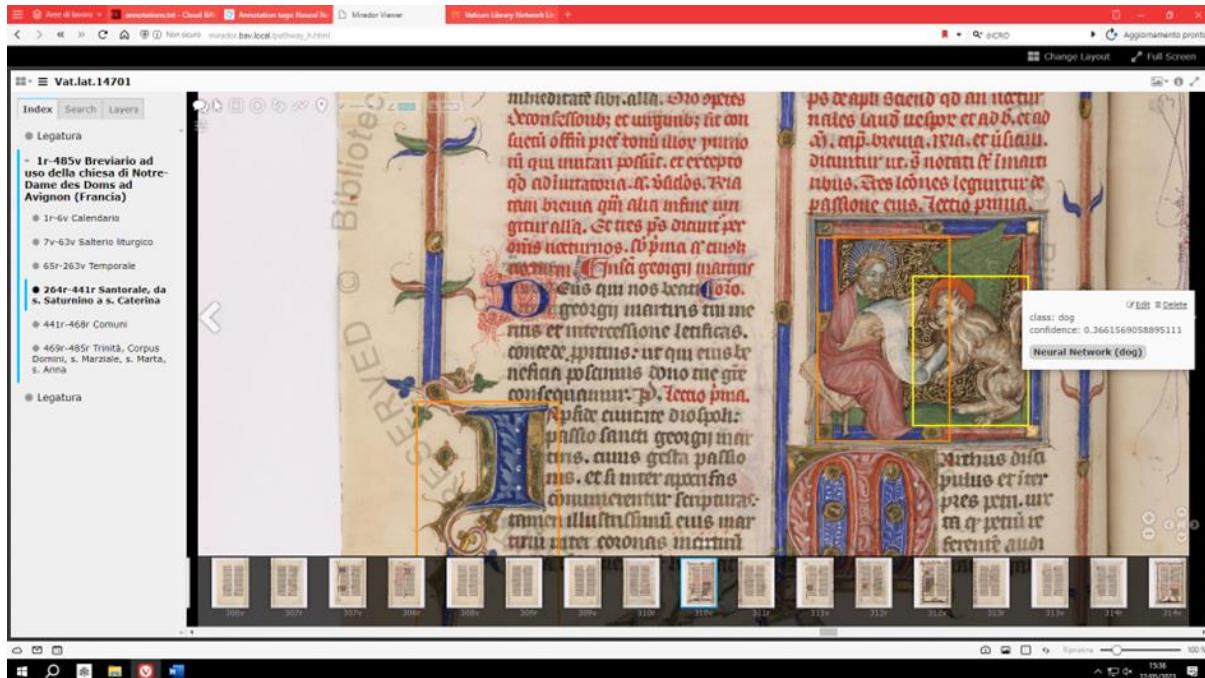


Fig. 41, Vat. lat. 14701, Folio 310 verso, L'intelligence artificielle a confondu le lion de Saint Jérôme avec un chien. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

¹⁵⁸ Le projet Zoologie de la BNF a connu le même problème : comme l'ensemble de données de Mandragore rassemble des collections du monde entier et sur un large spectre temporel (-1600 à 1900), un même animal peut être représenté de différentes manières, Source : « Mandragore : jeu d'images annotées sur le thème de la zoologie | Api », [s.d.], URL : <https://api.bnf.fr/fr/mandragore-jeu-dimages-annotees-sur-le-theme-de-la-zoologie>. Consulté le 31 août 2024.

¹⁵⁹ Cependant, il est important de nuancer cette affirmation car l'une des conclusions du projet Zoologie de la BNF était que la base de données Mandragore offre des liens intrinsèques entre des échantillons d'images, car ils font partie de collections telles que des livres ou des volumes. Cependant, ces liens peuvent engendrer des préjugés lors de l'apprentissage. Le classificateur peut repérer l'ouvrage dont la page est extraite. Puisque l'un d'eux est plus probablement composé d'une classe dominante, le classificateur peut déterminer la classe de la page. Ainsi, cela a eu un impact sur les résultats.

De plus, un approfondissement possible pour ce projet serait qu'il devienne un support pour l'histoire quantitative. Il permettrait par sa capacité à analyser de grands ensembles iconographiques d'établir la fréquence d'un animal particulier dans un corpus spécifique. Il serait intéressant de lier ce travail à la reconnaissance optique de caractères (OCR) pour contextualiser et aider la recherche. Il faudrait néanmoins toujours rester vigilant face à l'outil de l'IA, car il pourrait récupérer même en s'appuyant sur les textes, des erreurs des copistes. Rémy Cordonnier relatait l'exemple d'un manuscrit d'origine italienne qu'il a étudié où l'autruche a été illustrée par un chameau à cause d'une méconnaissance du latin par le copiste. En revanche, et c'est là toute la pertinence de l'IA appliquée à ces collections, avec une recherche iconographique par thématique, le chameau serait aisément identifiable comme une erreur dans un grand corpus d'images morphologiquement semblables. Il serait possible de découvrir potentiellement d'autres erreurs. D'autant que selon Pierre-Olivier Dittmar, les chercheurs apprécient qu'il y ait du bruit et des « erreurs » de classements lors de ces projets scientifiques. Cela leur permet d'avoir une vision d'ensemble et d'ainsi pouvoir tisser des liens entre différentes pistes de représentations iconographiques. Certaines erreurs sont au contraire des trouvailles pour les chercheurs. Avoir un aperçu avec une mosaïque d'images leur permettrait cette mise au point.

Selon les historiens interrogés, les chercheurs de ces thématiques auraient besoin d'un corpus assez large mais qui serait correctement référencé et annoté. Quand les chercheurs se lancent dans ce type de recherche, ils partent plutôt d'une hypothèse à étayer et ils se réfèrent à des corpus pour ce faire.

Pour le Citadelle et Mazenod¹⁶⁰ dans lequel il a participé, Rémy Cordonnier a dû fournir pas moins de 18 illustrations par chapitre pour chaque animal illustré. Or, trouver 18 illustrations de tortue est loin d'être simple, il a dû effectuer un dépouillement systématique des bases de reproduction de manuscrits en ligne en se basant sur les index qu'il pouvait trouver. La difficulté de ces grands corpus d'images réside également dans ces index et ces thésaurus choisis pour désigner les espèces et les catégories.

Il y a un vrai problème dans les catégories qui ont été choisies sur la plateforme pour ce projet. La catégorie « Animaux mythologiques » par exemple n'a pas lieu d'être. Au Moyen Âge, l'existence de la licorne n'était pas remise en doute, c'était un animal comme un autre.

Il faudrait plutôt distinguer les animaux qui, au Moyen Âge, ont un nom et toutes les figures hybrides faites de composition. Il arrive que chaque chercheur ait donné un nom et une indexation spécifique à ces espèces mythologiques, et il est parfois difficile de les faire correspondre. Chaque objet iconographique peut avoir plusieurs appellations potentielles. De plus, ce projet est international, il faudrait donc faire faire appel à un spécialiste dans chaque langue pour avoir les bons termes.

C'est tout le problème du thésaurus et de ces différentes appellations qui a aussi beaucoup limité le projet de la BAV. Un thésaurus ne reflète les pratiques que de ceux qui le décident, pratiques parfois contraintes de par leurs méconnaissances dans le domaine. Par exemple l'appellation du dragon a été brandie constamment dans les recherches de zoologie médiévale, or un dragon

¹⁶⁰ HECK (Christian) et CORDONNIER (Rémy), *Le bestiaire médiéval: l'animal dans les manuscrits enluminés*, Paris, Citadelles & Mazenod, 2018. 741.647 0902. ISBN : 9782850887239.

n'est un dragon à proprement parler que lorsque cela est spécifié dans le texte. Dans le cas contraire, c'est un serpent. Il faudrait plusieurs annotations pour le préciser et pouvoir plus facilement chercher ce qui, pour certains sera un dragon et pour d'autres, un serpent.

Pour le projet dont nous parlerons plus en détails dans la sous-partie suivante intitulée « *Armarium* » et proposant une exposition virtuelle sur les animaux, M. Cordonnier a été contacté car l'équipe scientifique du projet était incapable d'identifier les animaux. Il en va de même pour le projet de la BAV. La stagiaire dont le mémoire témoigne ici de l'expérience, ne possédait aucune notion de zoologie médiévale et a commis de nombreuses fautes d'identifications, dans un classement lui-même erroné.

Ce projet a-t-il donc une valeur pour la recherche ?

Comme l'évoquait Rémy Cordonnier, manipuler de telles masses d'informations peut permettre de voir des formes globales à travers une mosaïque de possibles. Pour les cas particuliers en revanche, l'IA n'est pour l'instant pas en mesure d'apporter un quelconque support contrairement à la recherche quantitative.

Il n'y a de toute façon aucun principe valable pour la totalité du Moyen Âge, le Moyen Âge étant une période complexe pour l'évolution des codes iconographiques. Ce n'est pas une production stéréotypée, l'ordinateur ne peut pas comprendre la différence d'une production humaine étalée sur un millénaire. En sciences humaines dans le domaine de l'iconographie, il n'est pour le moment pas possible de remplacer la réflexion humaine, concrète et pratique. Même la couleur n'est pas signifiante au Moyen Âge, l'artiste fait ce qu'il veut.

Pour des éléments beaucoup plus généraux et dont on pourrait dégager un stéréotype iconographique pertinent et une morphologie reconnaissable, le projet serait pertinent. Par exemple la représentation des anges, des hommes ailés, ou encore la représentation des saints auréolés que la machine a systématiquement identifié comme des *Teddy Bears* (Fig.42). Certes, elle s'est trompée dans son interprétation mais elle a réussi à les trouver et comme nous le disions plus haut même des erreurs peuvent être de vraies trouvailles. On pourrait imaginer des comparaisons sur la manière dont sont représentés les Saints et sur les symboliques qui les entourent. L'erreur principale du projet de la BAV aura été d'avoir voulu être trop précis.

The screenshot shows a search results page from a digital library. The search term is "Annotation tags: Neural Networkteddy bear". The results are filtered by "Annotation tags" and show four entries:

- 46r: Chig.C.VIII.234 — class: teddy bear confidence:** An annotation from a manuscript. It includes a thumbnail image of a figure, resource type (Annotation), manuscript (Chig.C.VIII.234), annotation text (class: teddy bear, confidence: 0.5786373615264893), and tags (Neural Network (teddy bear)).
- 46r: Chig.C.VIII.234 — class: teddy bear confidence:** Another annotation from the same manuscript, with similar details.
- 16v: Reg.lat.99 — class: teddy bear confidence:** An annotation from a manuscript. It includes a thumbnail image of a figure, resource type (Annotation), manuscript (Reg.lat.99), annotation text (class: teddy bear, confidence: 0.5924818515777588), and tags (Neural Network (teddy bear)).
- 4r.[03.hx.b000]: Cappon.237.pt.A — class: teddy bear confidence:** An annotation from a manuscript. It includes a thumbnail image of a figure, resource type (Annotation), manuscript (Cappon.237.pt.A), and annotation text (class: teddy bear).

Fig. 42, Résultat d'une recherche ayant pour étiquette « Teddy Bear ». Les Saints ont été sélectionnés à cause de leurs auréoles. Source : © Camille Ferrari, capture d'écran personnelle.

Il faut réussir à partir d'un schéma de construction iconographique déjà très établi comme de nombreux exemples dans ce mémoire l'ont déjà démontré. Il n'y a qu'en partant de métadonnées propres, triées et pertinentes que les résultats de l'IA peuvent l'être également. De plus, cette mise en place de métadonnées est extrêmement compliquée pour une thématique comme les animaux dans la mesure où il n'y a, par exemple, que trois chercheurs dans le monde qui connaissent parfaitement les oiseaux.

Selon Marion Charpier, docteure en histoire et civilisation et historienne de l'art, spécialiste du dragon médiéval, l'utilisation de l'intelligence artificielle sur des bestiaires pour identifier des animaux pourrait fonctionner. Mais il faudrait pour cela entraîner l'algorithme avec une base de données bien plus proche en termes de dates et de supports d'une collection médiévale que COCO¹⁶¹. Pour elle, l'intérêt du projet réside dans la mise en avant de ce qui n'a pas marché. Il aurait sûrement été plus pertinent d'entraîner l'intelligence artificielle sur un corpus d'iconographies médiévales et d'effectuer un travail d'ontologie des termes du bestiaire médiéval bien plus important en amont.

Enfin, un des enjeux principaux du projet selon Pierre-Olivier Dittmar repose sur la pérennité des données. À l'EHESS, au début des années 1990, il a participé au projet de l'indexation iconographique sur vidéodisque des manuscrits enluminés de la Vaticane, projet impulsé à l'époque par l'École française de Rome. A cause de l'évolution des supports, ils ont longtemps cru que le contenu des vidéos disques était perdu. Il ne souhaite donc pas que ce problème se pose de nouveau¹⁶².

¹⁶¹ Voir grand II/ 1) C. Les limites du *deep learning*.

¹⁶² Propos de Pierre-Olivier Dittmar.

Selon Rémy Cordonnier, dans la mesure où bibliothécaire et chercheur sont deux professions différentes, la bibliothèque doit avoir pour rôle de veiller à trouver le bon outil pour le chercheur sans pour autant tenter d'interpréter à sa place ses recherches.

Face aux problématiques énoncées ci-dessus, nous nous sommes demandé quelles utilisations pouvaient finalement être faites de ce projet. Les réponses que nous offrons à cette interrogation s'articulent autour de l'idée de changer la ligne directrice de ce dernier ainsi que le public auquel il était majoritairement destiné, les chercheurs, pour le proposer à une plus large audience.

Marion Carré l'a rappelé lors de son intervention pour la soirée de l'ICOM « Et demain ? Intelligence artificielle et musées »¹⁶³, l'intelligence artificielle s'emploie aujourd'hui dans des domaines variés telle que la médiation¹⁶⁴. Pour M. Cordonnier, ce type de logiciel et ces procédures techniques seront plus à même de créer un contenu pertinent et attractif pour des usagers lambda.

B. Intelligence artificielle et médiation culturelle

La thématique des animaux est une thématique universelle qui plait à un public large et divers, des enfants au troisième âge, comme en témoigne le succès de l'exposition du Louvre Lens sur les animaux¹⁶⁵ ou celui de la borne numérique numéro 7 dans la Salle Ovale du site Richelieu à Paris¹⁶⁶.

Il ne serait donc pas absurde d'utiliser le dispositif de la BAV dans une démarche de médiation culturelle pour mieux faire connaître ses fonds et il existe différents supports numériques pour développer cette idée.

En France, l'*Armarium*¹⁶⁷, la bibliothèque numérique du patrimoine écrit, graphique et littéraire des Hauts-de-France, a présenté une exposition virtuelle sur la thématique des animaux. Intitulée « Sublimes animaux », elle présente un panorama en quatre chapitres de l'iconographie animalière dans ses collections : « les animaux du quotidien, les animaux exotiques, les animaux imagés, les animaux comme symboles ». Chacune de ces parties présente des sous-parties thématiques avec des illustrations correspondantes comme l'exemple des évangélistes comme sous-catégorie des animaux comme symboles.

Dans la même sous-partie sont reliés des citations des évangiles ainsi que des points d'explications de contexte historique ou de matériaux utilisés (Fig. 43).

¹⁶³ « Et demain ? Intelligence artificielle et musées », ICOM France, 27 octobre 2023. URL : <https://www.icom-musees.fr/actualites/et-demain-intelligence-artificielle-et-musees-0>. Consulté le 3 août 2024.

¹⁶⁴ Marion Carré a cocréé la start-up Ask Mona en 2017. Son entreprise propose aux institutions culturelles des outils conversationnels basés sur des logiciels d'intelligence artificielle. « AskMona », [s.d.]. URL : <https://www.askmona.fr/>. Consulté le 2 septembre 2024.

¹⁶⁵ « Exposition Animaux fantastiques », Louvre-Lens, [s.d.]. URL : <https://www.louvrelens.fr/exhibition/animaux-fantastiques/>. Consulté le 2 septembre 2024.

¹⁶⁶ Borne qui permet de plonger dans les collections de la BNF avec 5 animaux

¹⁶⁷ « Armarium Hauts de France - Exposition virtuelle - Sublimes animaux », [s.d.]. URL : <https://expo.armarium-hautsdefrance.fr/sublimes-animaux>. Consulté le 2 septembre 2024

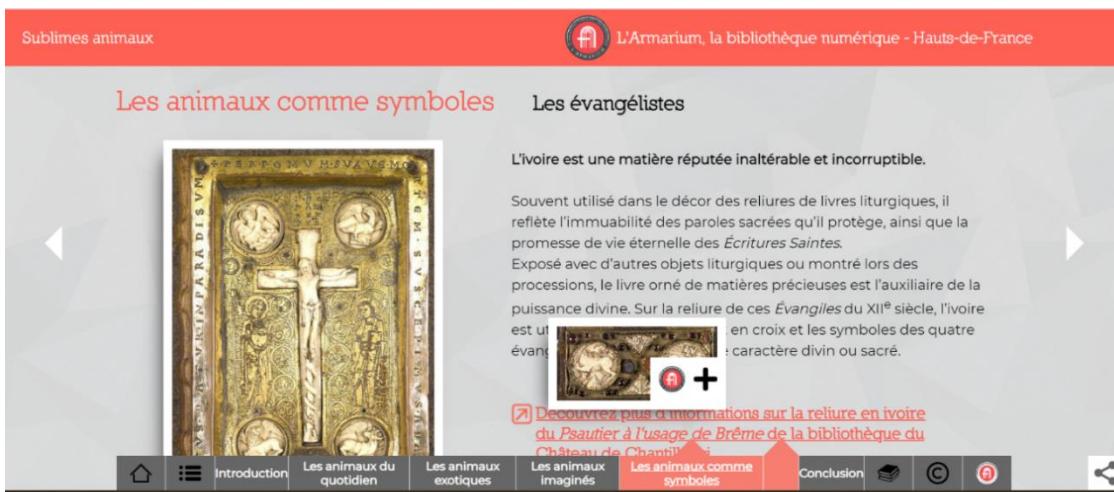


Fig. 43, Sous-partie de l'exposition virtuelle « Sublimes animaux », créée par l'Armarium. Source : Armarium, en ligne : <https://expo.armarium-hautsdefrance.fr/sublimes-animaux>. Consulté le 2 septembre 2024.

Ce type de manuscrits est similaire à ceux de la BAV et un modèle d'exposition virtuelle plus accessible pourrait être une bonne entrée en matière pour la découverte et la mise en valeur des fonds.

Dans un champ encore plus ludique, les animaux amenant facilement une touche de divertissement, la BnF a développé il y a quelques années grâce à Nathalie Ryser, cheffe de projet en médiation numérique, une application nommée Fabricabrac¹⁶⁸ (Fig. 44). L'application utilise essentiellement des éléments iconographiques tirés des collections de la BnF. L'application est destinée à un public d'enfants (et leurs parents) et leur permet de créer des animaux hybrides en piochant des éléments (corps, tête, queue, etc) dans un éventail de possibilités tirés des fonds. L'enfant peut manipuler ces éléments, les agrandir, les retourner, apprendre à les connaître et les reconnaître. Il a également la possibilité de créer un monde imaginaire et un alphabet, toujours à partir des mêmes sources. Des notices rédigées spécialement prolongent la découverte des documents patrimoniaux. C'est un premier pas dans les collections de la bibliothèque. Cela permet de faire entrer les enfants dans l'univers des collections et d'éveiller leur curiosité tout en les sensibilisant.

Dans « GallicaPix »¹⁶⁹, il existe un filtre d'interrogation des collections par couleurs (en noir et blanc, monochrome, en couleur ou selon les couleurs dominantes de l'illustration). Ce mode de recherche existe également sur la deuxième borne numérique de la salle Ovale du Site Richelieu de la BnF, dans la « mise en abyme des collections ». Elle rencontre un franc succès auprès des visiteurs justement de par son aspect ludique¹⁷⁰. Cela pourrait être une modalité à expérimenter pour le projet de la BAV.

¹⁶⁸ « Fabricabrac | Editions de la Bibliothèque nationale de France », [s.d.]. URL : <https://editions.bnf.fr/fabricabrac>. Consulté le 12 août 2024.

¹⁶⁹ « GallicaPix, un nouvel outil d'exploration iconographique | Le blog de Gallica », [s.d.]. URL : <https://gallica.bnf.fr/blog/21062021/gallicapix-un-nouvel-outil-dexploration-iconographique?mode=desktop>. Consulté le 3 août 2024.

¹⁷⁰ Propos de Nathalie Ryser



Fig. 44, Logo de l'application Fabricabrac. Source : BnF, en ligne : <https://editions.bnf.fr/fabricabrac>. Consulté le 2 septembre 2024.

Dans un autre registre, la bibliothèque publique d'information organise chaque année grâce à son service « Nouvelle génération », un festival de jeux vidéo intitulé Press Start¹⁷¹.

¹⁷¹ Bibliothèque publique d'information, « Au programme de Press Start 2021 » (septembre 2021). URL : <https://www.bpi.fr/ark:/34201/tx10040696t>. Consulté le 12 août 2024.



Fig. 45, Affiche du festival Press Start 2021 sur le thème du jeu vidéo et du bestiaire médiéval.
Source : Bpi, en ligne : <https://www.bpi.fr/ark:/34201/tx10040696t>. Consulté le 2 septembre 2024.

Chaque année, une thématique est choisie. En 2021, la thématique portait sur le bestiaire du jeu vidéo (Fig. 45). Une quinzaine de jeux étaient proposés pour jouer en libre-service à l'accueil de la bibliothèque¹⁷². Parmi eux, le jeu vidéo médiéval « Inkulinati », (Fig. 46), a rencontré un franc succès parmi les utilisateurs¹⁷³. C'est un jeu de stratégie où deux joueurs peuvent s'affronter dans une bataille reprenant le graphisme des enluminures médiévales. Les protagonistes sont entre autres des animaux enluminés repris sous forme d'avatars. Ce jeu est une représentation intéressante de la reprise de l'iconographie médiévale au sein d'éléments beaucoup plus actuels.

¹⁷² CHARRAIRE (Fabienne), « Press Start 2021 : Les bestiaires du jeu vidéo », Dossier, Balises - Le magazine de la Bpi, 14 septembre 2021. URL : <https://balises.bpi.fr/ark:/34201/ds10040731t>. Consulté le 2 septembre 2024.

¹⁷³ L'auteure de ces lignes était à l'époque médiatrice du festival Press Start.



Fig. 46, Jeu vidéo de stratégie « Inkulinati ». Source : Youtube, en ligne :<https://www.youtube.com/watch?v=Ns-br2PfFeo>. Consulté le 2 septembre 2024.

Il est à la fois une mise en avant de l'esthétisme du Moyen Âge, une porte vers la redécouverte de collections patrimoniales et un apport pour la reconnaissance visuelle du jeu.

Le jeu *A Plage tale innocence* paru en 2019¹⁷⁴, qui se déroule en France en 1348 lors de l'épidémie de peste noire, met en scène deux véritables manuscrits enluminés : le livre d'heures de Catherine de Clèves (vers 1440) et le livre d'heures dit de Fentener van Vlissingen (1430-1435), conservés respectivement à la Morgan Library de New York et à la bibliothèque nationale des Pays-Bas à la Haye (Fig. 47). Bien que ces documents soient plus tardifs que le contexte du jeu vidéo dans lequel ils sont présentés, leur présence est un accompagnement esthétique au jeu et permet une mise en lumière qu'ils n'auraient pas connue sinon.

¹⁷⁴ « Jean Jouberton : Dans *A plague tale* », [s.d.]. URL : https://fr.linkedin.com/posts/jeanjouberton_histoire-de-lart-jeu-vid%C3%A9o-dans-%3F-activity-7142838510025150464-mD67. Consulté le 2 septembre 2024.

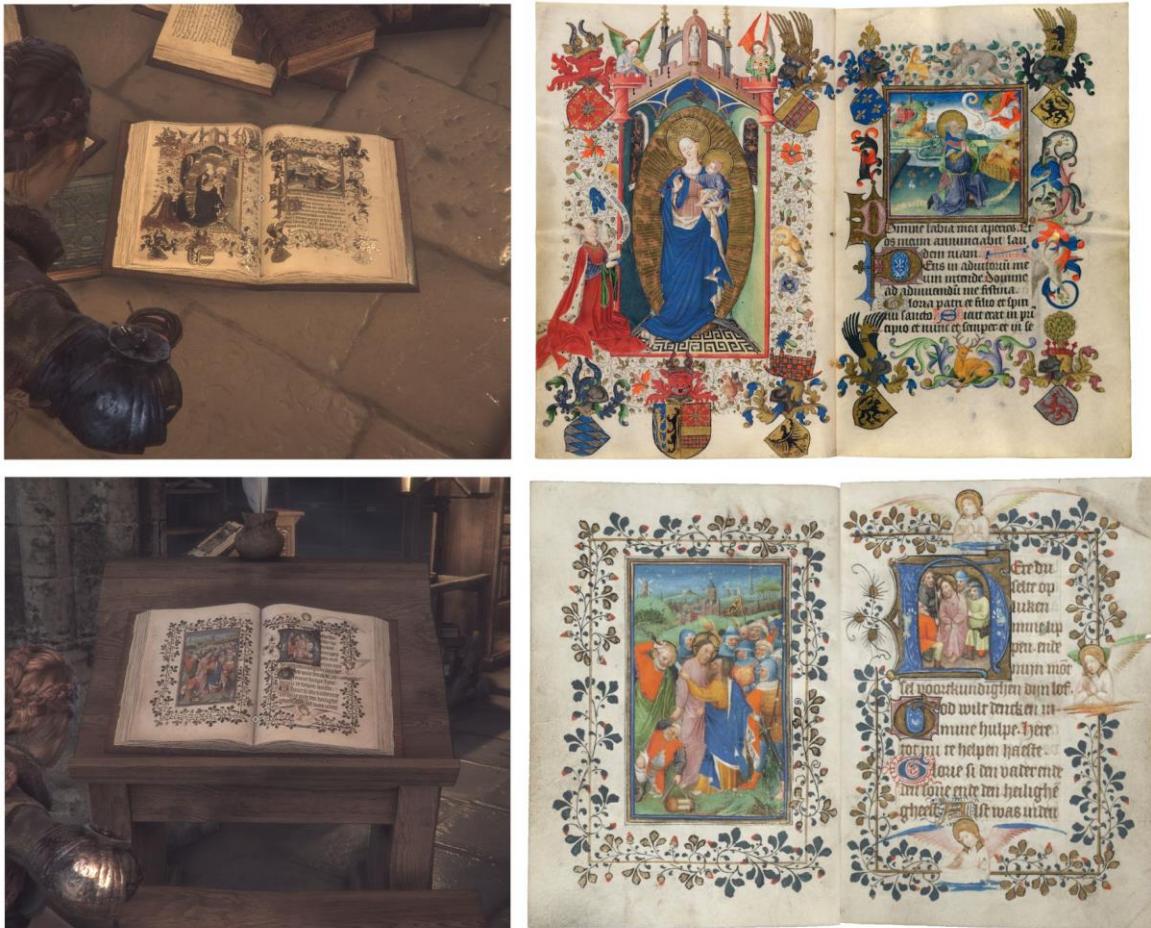


Fig. 47, Captures d'écrans du jeu vidéo *A Plage tale innocence* et des deux manuscrits qui y sont représentés, le livre d'heures de Catherine de Clèves (vers 1440) et le livre d'heures dit de Fentener van Vlissingen (1430-1435). Source : Jean Jouberton, en ligne : <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7142838510025150464/>. Consulté le 2 septembre 2024.

Enfin, nous concluons notre propos avec un exemple sur lequel se déroule actuellement (jusqu'au 10 novembre 2024) une exposition à l'Institut du monde arabe, à Paris¹⁷⁵, l'un des derniers jeux de la célèbre série de jeux vidéo *Assassin's Creed®* développée par Ubisoft, intitulé *Assassin's Creed Mirage*. Il se déroule à Bagdad, au IX^e siècle, en plein âge d'or de l'Islam. L'exposition à l'Institut du monde arabe décrit la manière dont les ingénieurs et les chercheurs se sont inspirés des plans anciens et des sources historiques sur la ville pour la recréer le plus fidèlement durant la période de son apogée. Ici point d'animaux, mais la même idée d'utilisation du numérique, voire de l'intelligence artificielle, pour recréer des éléments perdus, offrir un apport historique et esthétique au jeu et donner à un public particulièrement large et hétéroclite une idée de ce que pouvait être la capitale du califat abbasside, centre de savoirs pendant des siècles (Fig. 48 et 49).

¹⁷⁵ « Bagdad : redécouvrir Madinat al-Salam, avec Assassin's Creed® Mirage », *Institut du monde arabe*, 19 janvier 2024. URL : <https://www.imarabe.org/fr/expositions/bagdad-redecouvrir-madinat-al-salam-avec-assassin-s-creedr-mirage>. Consulté le 12 août 2024.

Certes, il ne semble pas se dessiner un accord entre Ubisoft et la Bibliothèque papale pour le moment, mais utiliser un projet numérique de recherches pour servir de support notamment iconographique et contextuel à des enjeux de médiation et de loisir, est un autre moyen, souvent bien efficace de conserver la mémoire de ces fonds patrimoniaux. Ubisoft n'a pas dévoilé de chiffres précis mais a confirmé qu'*Assassin's Creed Mirage* était en termes de vente le meilleur démarrage de la firme depuis 2015.



Fig. 48, Panorama de la ville de Bagdad, dans le jeu *Assassin's Creed Mirage*. Source : <https://www.guidestash.com/news/assassins-creed-mirage/assassins-creed-mirage-release-date-and-gameplay-revealed/>. Consulté le 2 septembre 2024.



Fig. 49, Plan de la ville de Bagdad dans le jeu vidéo Assassin's Creed Mirage. Source : <https://videogames.si.com/guides/assassins-creed-mirage-map-size>. Consulté le 2 septembre 2024.

Comme le rappelait Aslak Sira Myhre, directeur de la bibliothèque nationale de Norvège, lors des rencontres « Futurs Fantastiques » 2021¹⁷⁶, si nous voulons que les usagers aient envie de découvrir les collections alors que nous créons de plus en plus de dispositifs numériques en quantité souvent non assimilables et pas toujours accessibles, il faut rendre cela amusant. Nous devons créer nos propres divertissements éducatifs d'autant qu'il n'est pas nécessaire de légitimer l'amusement.

¹⁷⁶ Bibliothèque nationale de France, « Les Futurs Fantastiques » – Les défis de l'IA dans les galeries, bibliothèques, archives et musées », 3^e conférence internationale sur l'intelligence artificielle, Bibliothèque nationale de France, Université Paris Saclay, 8-10 décembre 2021. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=4CFDdGmilGk>. Consulté le 3 août 2024.

CONCLUSION :

Ce mémoire s'est donc attaché à analyser dans une première partie l'arrivée de l'intelligence artificielle dans le domaine des sciences humaines et tout particulièrement le perfectionnement de l'IA depuis quelques années dans le domaine des images. Cette amélioration dans le champ iconographique a donné naissance à de nombreux projets nationaux et internationaux menés par les institutions culturelles pour utiliser la fouille d'images comme outil numérique. Ce travail revient donc en premier lieu sur ces avancées et les différents travaux qui en ont émergé.

Dans une deuxième partie, ont été étudiées les applications concrètes de l'IA et les possibilités qu'elle pourrait apporter face à une profusion de données impossibles à parcourir rapidement pour l'homme : recherche visuelle grâce à la reconnaissance morphologique d'individus dans des images, diagnostic de conservation des collections de la BnF, restauration d'œuvres d'arts.... Les dérives potentielles de ces possibilités sont également évoquées avec l'exemple de l'intelligence artificielle générative. C'est également dans cette seconde partie qu'est décrit le processus technique du projet de la BAV avec l'utilisation d'un réseau de neurones convolutifs permettant la reconnaissance d'images. Les informaticiens de la BAV ont donc codé et entraîné l'algorithme YOLO pour segmenter les pages numérisées avant de le coder pour lancer une reconnaissance d'animaux sur ces segmentations, reconnaissance basée sur les espèces présentes dans le corpus d'images de photographies contemporaines COCO. Cette procédure est détaillée et les résultats qui en sont tirés sont analysés numériquement et de manière codicologique.

En troisième partie, les limites du projet de la Vaticane permettent d'introduire les différentes problématiques qu'entraîne l'utilisation de l'IA en termes d'interopérabilité et de « découvrabilité » pour les chercheurs. Le sujet de la zoologie médiévale n'est peut-être pas le plus pertinent pour un projet d'IA mais dégage une opportunité de médiation pertinente et la possibilité de rendre accessible ces outils numériques à toutes et tous, soulevant au passage des questions de droits et de pertinence scientifique.

Les possibilités offertes par l'intelligence artificielle gagnent en importance à l'échelle nationale. En 2023, le projet « Gallica Images » a été initié grâce au soutien du programme d'investissements d'avenir (France 2030)¹⁷⁷. L'objectif est de faciliter l'accès à toutes les images en industrialisant le principe de segmentation (à l'aide du protocole IIIF) et de caractérisation (format, couleurs, typologie...) par intelligence artificielle, comme l'a expérimenté la BAV.

Ce projet, mené en partenariat par la BnF, la Bibliothèque nationale et universitaire (BNU) de Strasbourg et l'Institut national de l'histoire de l'art (INHA), pose des interrogations importantes : de quelle manière peut-on traiter numériquement un tel volume d'images (plus de 100 millions sur Gallica) tout en offrant une interface accessible et fonctionnelle pour les utilisateurs ?

¹⁷⁷ BOUVIER (Anne), « L'IA à la Bibliothèque nationale de France : la patrimonialisation 4.0 », *La Jaune et la Rouge*, 2 janvier 2023. URL : <https://www.lajauneetlarouge.com/ia-a-la-bnf-la-patrimonialisation-4-0/>. Consulté le 12 août 2024.

Quelles sont les mesures prises pour garantir le respect des informations personnelles et des contenus protégés par la propriété intellectuelle?

Surtout, cette entreprise témoigne des besoins financiers nécessaires pour mener à bien ces expérimentations, expérimentations bien plus répandues au sein d'institutions nationales soutenues par l'État. Les bibliothèques de musées qui possèdent en leur sein de nombreuses ressources iconographiques ne disposent pas de la même enveloppe budgétaire. Il leur reste à attendre que l'IA se perfectionne dans d'autres domaines plus porteurs et dans des institutions culturelles plus solides financièrement, à l'image des techniques de réalité virtuelle développées par AIRBUS en aviation¹⁷⁸ et reprises ensuite par le patrimoine. En tant que bibliothécaire du centre de recherches d'un musée territorial, l'auteure de ces lignes est curieuse d'observer si ces évolutions numériques permettront d'ici quelques années de mettre en valeur le parent pauvre des musées territoriaux : leurs bibliothèques de recherches.

¹⁷⁸ « Airbus fait décoller sa réalité mixte vers le métavers », *LeMagIT*, [s.d.]. URL : <https://www.lemagit.fr/etude/Airbus-fait-decoller-sa-realite-mixte-vers-le-metavers>. Consulté le 2 septembre 2024.

ANNEXES :

Annexe A : Tableau¹⁷⁹ présentant l'ensemble des manuscrits comportant des annotations de représentations d'animaux, au cours des siècles et selon leur lieu de provenance.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1		Annotazioni	I	II	III	IV	V	V	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XI
2	Arch.Cap.S.Pietro.A.24	2														✓
3	Arch.Cap.S.Pietro.A.25	0														✓
4	Arch.Cap.S.Pietro.B.63	7														✓
5	Arch.Cap.S.Pietro.D.153	0														✓
6	Arch.Cap.S.Pietro.F.16	0														✓
7	Arch.Cap.S.Pietro.F.45	1														✓
8	Barb.lat.157	6														
9	Barb.lat.570	0														✓
10	Borgh.183	5														
11	Capp.Giulia.XII.4	0														
12	Capp.Giulia.XIII.27	0														
13	Capp.Sist.14	0														
14	Capp.Sist.15	0														
15	Capp.Sist.160	18														
16	Capp.Sist.34	0														
17	Capp.Sist.36	0														
18	Capp.Sist.51	0														

I / I	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1	XVII	XVIII	XIX	XX	Lingua	Paese	Regione	Località			
2					Latino	Italia	Italia centrale	Ø			
3					Latino	Italia	Italia centrale	Ø			
4					Latino	Italia	Emilia-Romagna	Bologna			
5					Latino	Germania	Ø	Ø			
6					Latino	Italia	Lazio	Roma			
7					Latino	Ø	Ø	Ø			
8					Latino	Italia	Ø	Ø			
9					Latino	Inghilterra	Inghilterra centro-meridionale ?				
10					Latino	Ø	Ø	Ø			
11					Latino	Ø	Ø	Ø			
12					Francese/Olandese/Latino/Italiano/Spa		Italia	Toscana	Firenze		
13					Latino	Italia	Campania?	Napoli?			
14					Latino	Italia	Lazio	Roma			
15					Latino	Ø	Paesi Bassi del Sud	Ø			
16					Latino	Ø	Paesi Bassi del Sud	Ø			
17					Latino	Ø	Paesi Bassi del Sud	Ø			
18					Latino	Italia	Ø	Ø			

¹⁷⁹ (Le tableau se trouve sur la plateforme GitHub à l'adresse <https://github.com/Camille8135?tab=repositories>)

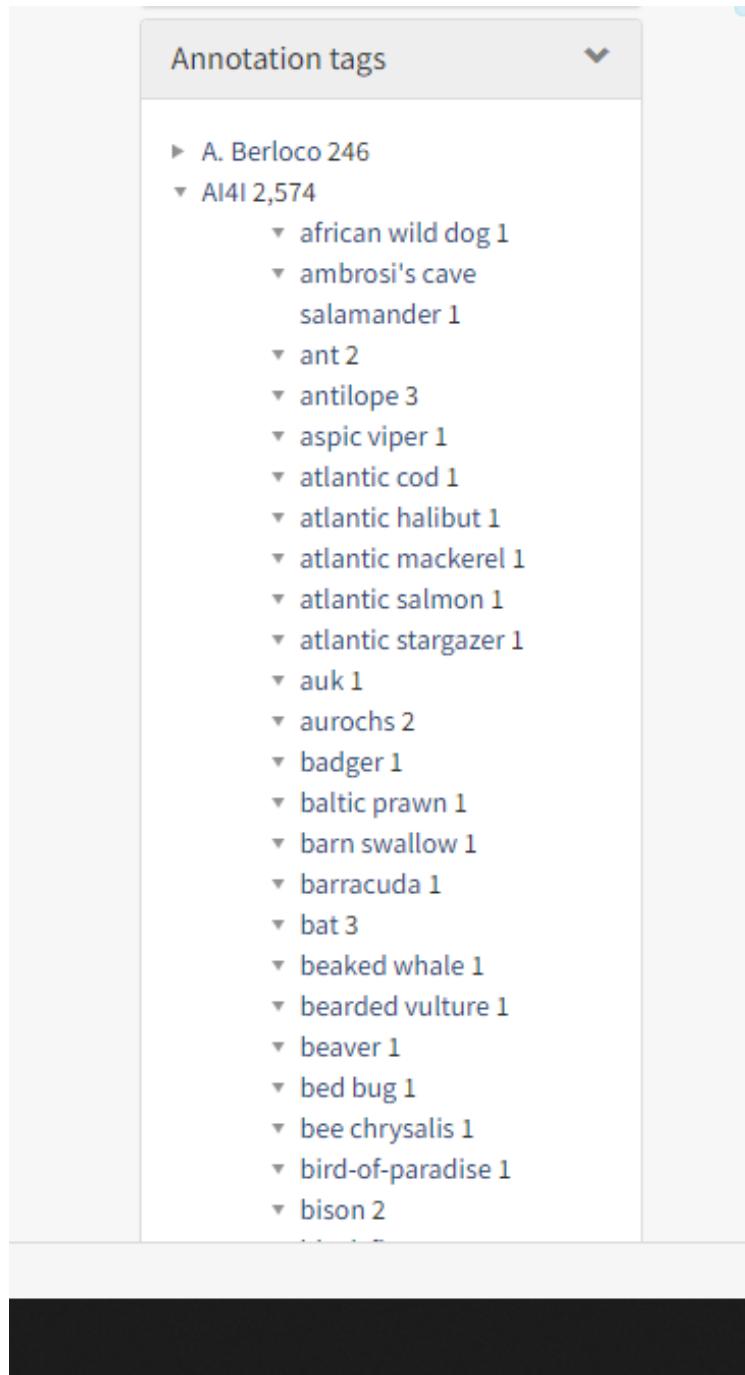
Annexe B : Liste des manuscrits utilisés pour le projet et nombre d'annotations de représentations d'animaux par manuscrits.

Manuscrits	Nombre d'annotations
Arch.Cap.S.Pietro.A.24	2
Arch.Cap.S.Pietro.A.25	0
Arch.Cap.S.Pietro.B.63	7
Arch.Cap.S.Pietro.D.153	0
Arch.Cap.S.Pietro.F.16	0
Arch.Cap.S.Pietro.F.45	1
Barb.lat.157	6
Barb.lat.570	0
Borgh.183	5
Capp.Giulia.XII.4	0
Capp.Giulia.XIII.27	0
Capp.Sist.14	0
Capp.Sist.15	0
Capp.Sist.160	18
Capp.Sist.34	0
Capp.Sist.36	0
Capp.Sist.51	0
Cappon.224	3
Cappon.227	1
Cappon.236	4
Cappon.237.pt.A	13
Cappon.285	20
Cappon.289	0
Chig.C.IV.109	11
Chig.C.VIII.234	36
Chig.L.VIII.296	163

Manuscrits	Nombre d'annotations
Chig.R.VI.37	0
Ott.gr.354	65
Pal.gr.431.pt.B	0
Pal.lat.1	0
Pal.lat.1071	1224
Pal.lat.1632	30
Pal.lat.538	12
Pal.lat.540	4
Pal.lat.660	8
Reg.lat.165	2
Reg.lat.466	0
Reg.lat.534	4
Reg.lat.87	25
Reg.lat.99	21
Ross.1167	1
Ross.197	0
Ross.379	1
Urb.lat.1	4
Urb.lat.161	0
Urb.lat.1639	0
Urb.lat.166	0
Urb.lat.2	39
Urb.lat.276	500
Urb.lat.365	22
Urb.lat.899	22
Vat.estr.or.148	2
Vat.estr.or.159	6
Vat.gr.1162	0

Manuscrits	Nombre d'annotations
Vat.gr.1613	23
Vat.gr.1754	0
Vat.gr.1927	21
Vat.gr.333	2
Vat.gr.699	21
Vat.gr.746.pt.1	118
Vat.gr.746.pt.2	31
Vat.gr.747	36
Vat.gr.751	13
Vat.gr.752.pt.1	31
Vat.gr.752.pt.2	0
Vat.lat.1202	5
Vat.lat.14701	124
Vat.lat.20	9
Vat.lat.3225	0
Vat.lat.3251	0
Vat.lat.3302	6
Vat.lat.3439	29
Vat.lat.3868	0
Vat.lat.4776	13
Vat.lat.85	0

Annexe C : Extrait des “tags” (étiquettes) créés à la main et utilisés pour naviguer dans les fonds sur la plateforme Spotlight.



Annexe D : Présentation détaillée des fonds¹⁸⁰

Archivio del Capitolo di San Pietro (Manoscritti)

La collection de manuscrits s'élève à 494 pièces. Elle correspond à la partie manuscrite de la bibliothèque capitulaire de la basilique Saint-Pierre du Vatican. Elle est issue de deux noyaux différents, rassemblés vers 1484, lors de la construction d'un nouveau bâtiment : on connaît le contenu de la collection grâce aux inventaires dressés en 1361, vers 1405 et en 1436, et grâce à la liste de 241 manuscrits jointe au testament du cardinal Giordano Orsini en 1438.

Vers la fin du XV^e siècle, les manuscrits reçoivent une marque de classement, encore visible sur la première page de nombreux codices, consistant en un grand chiffre romain. La collection subit quelques pertes, notamment lors du sac de Rome en 1527. Entre le XVI^e et le XVII^e siècles, c'est au Bolonais Giacomo Grimaldi (1560-1623) que l'on doit notamment la description des manuscrits, des documents d'archives et du Trésor de la basilique Saint-Pierre.

Les manuscrits, la plupart des archives et les livres imprimés anciens ont été donnés en dépôt à la Bibliothèque vaticane par le chapitre en 1940. Les manuscrits actuels, séparés de l'ensemble lors de leur entrée à la Vaticane, comprennent, en plus des manuscrits principalement latins, quatorze codices grecs (Arch. Cap. S. Pietro B.58, B. 59, B. 141, C.144, C. 149-154, D.157, E.16, H.4, H.45) et plusieurs dans d'autres langues, dont un composite en partie persan et en partie chinois (Arch. Cap. S. Pietro H. 26), deux arméniens (Arch. Cap. S. Pietro B.77, F.39) et un slave (Arch. Cap. S. Pietro D. 215).

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Arch.Cap.S.Peter.A.24

Arch.Cap.S.Peter.B.63

Arch.Cap.S.Peter.F.45

Barberiniani

Outre les nombreux volumes originaux rassemblés par Maffeo Barberini, futur Urbain VIII (1623-1644), qui furent remis à la bibliothèque familiale au début de son pontificat, la véritable "naissance" de la collection de livres de la famille Barberini remonte à l'œuvre du neveu du pape, Francesco (1597-1679), cardinal en 1623. La vie de Francesco correspond en effet à la période de développement la plus importante des collections de manuscrits et de livres imprimés grecs, latins et orientaux, en parallèle de l'évolution des collections de la Vaticane.

Ni le décès d'Urbain VIII (26 juillet 1644) ni la diminution du rôle institutionnel de la famille, n'empêche la collection de livres et du mécénat d'augmenter encore considérablement. La Barberiniana était alors, à la fin du XVII^e siècle, l'une des plus grandes bibliothèques d'Italie pour sa collection de livres, la deuxième à Rome après la bibliothèque du Vatican. Les acquisitions des XVIII^e et XIX^e siècles, période de l'histoire de la collection peu étudiée

¹⁸⁰ La source principalement utilisée pour ce complément est D'AIUTO (Francesco) et VIAN (Paolo), *Guida ai fondi manoscritti, numismatici, a stampa della Biblioteca vaticana*, Città del Vaticano, 2011 (Studi e testi, n° 466-467). ISBN : 9788821008849.

jusqu'ici, sont moins considérables, mais l'augmentation des archives et des livres imprimés demeure importante. Au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle, la bibliothèque est réorganisée avec un nouveau classement des manuscrits, toujours en vigueur aujourd'hui.

Les manuscrits grecs débutaient le classement suivis des manuscrits orientaux et des manuscrits latins. En 1902, sur ordre de Léon XIII (1878-1903), la Vaticane acquit la bibliothèque et les archives Barberini.

Manuscrit utilisé lors du projet d'IA :

Barb.lat.157

Borghesi

La collection comprend la majorité des manuscrits (390 signatures, mais 386 pièces) provenant de la bibliothèque papale d'Avignon. Elle comptait plus de 2 000 volumes à l'époque d'Urbain V (1362-1370) et fut agrandie, mais ne fut transportée que partiellement (environ mille volumes) par Benoît XIII (1394-1423) à Péniscola en 1411, puis dispersée. Les papes récupérèrent peu à peu la partie restée à Avignon au cours des XV^e et XVI^e siècles, avec plusieurs transports à Rome, et elle est en grande partie conservée aujourd'hui dans la collection latine du Vatican.

Il ne resta donc plus à Avignon en 1594 que 329 volumes : c'est ce qui fut donné par Paul V (1605-1621) à son neveu Scipione Caffarelli Borghese (1576-1633), cardinal-légat d'Avignon (1607-1621) (et cardinal bibliothécaire 1609-1618). La collection, qui connut ensuite une petite expansion, demeura dans la famille Borghèse jusqu'en 1891, année où elle fut achetée par Léon XIII (1878-1903) et intégrée au fonds de la Bibliothèque vaticane.

Initialement intégrée aux *Vaticani latini*, elle fut ensuite regroupée en collection distincte. Presque tous les manuscrits, médiévaux et latins, sont principalement philosophiques et théologiques.

Manuscrit utilisé lors du projet d'IA :

Borgh.183

Cappella Sistina (Manoscritti)

Étant donné l'importance du collège de la chapelle pontificale pour l'histoire de la musique, nous pouvons dire qu'il s'agit d'une collection exceptionnelle, d'autant plus qu'une collection aussi riche, qui couvre en outre une période d'environ quatre siècles, n'a été conservée dans aucune autre institution musicale. Si le Collège de la Chapelle pontificale n'a été internationalement important que dans les deux dernières décennies du XV^e siècle et pendant la majeure partie du siècle suivant, la pratique musicale et liturgique du Collège est restée, jusqu'à sa dissolution en 1870, centrale pour toutes les institutions musicales de l'Église catholique.

Le fonds (709 cahiers mais 708 pièces) comprend 546 unités qui peuvent être classées comme sources musicales, divisées à leur tour en 402 manuscrits et 144 livres imprimés. A cela s'ajoutent 101 pièces, dont des chemises, des enveloppes et des codices contenant du matériel d'archives et, enfin, quelques inventaires de fonds. Le noyau principal est donc composé de manuscrits musicaux, principalement des livres de chœur de grand ou très grand format, qui

renferment la plupart du répertoire de la musique liturgique et paraliturgique de la Chapelle pontificale.

La Chapelle pontificale n'a pas produit tous les manuscrits et tous les imprimés musicaux ne lui sont pas non plus attribuables, dans la mesure où ils ne sont pas toujours le reflet de la pratique musicale de la Chapelle. En effet, dans certains cas, ils ne sont entrés que plus tard dans les archives musicales du Collège.

Cette collection comprend également les « Inventaires de manuscrits et de livres de musique imprimés », importants pour l'histoire de la collection, mais seulement à partir de 1687, date de la compilation du premier inventaire par Raffaele Panuzzi (Capp.Sist. 630). Tout effort de reconstitution de l'histoire de la collection avant cette date est fortement limité par la perte d'inventaires plus anciens.

Manuscrit utilisé lors du projet d'IA :

Capp.Sist.160

Cappon.

Il s'agit de la collection du marquis Alessandro Gregorio Capponi (1683-1746), dernier représentant de la branche romaine de sa famille florentine. Capponi a consacré sa vie à la constitution d'une bibliothèque de littérature italienne.

La collection compte 318 pièces mais 313 pièces sont liées à l'activité d'érudit et de collectionneur de manuscrits du marquis. Selon son testament en date du 26 avril 1745, Capponi désigne la Bibliothèque Vaticane comme héritière de ses livres, imprimés et manuscrits. La bibliothèque, transportée au Vatican le 7 décembre 1746, contenait 3546 pièces, dont 289 manuscrits.

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Cappon.224

Cappon.227

Cappon.236

Cappon.237.pt.A

Cappon.285

Chigiani

La collection (3 635 signatures, mais 3 636 pièces) de la Biblioteca Chigiana est composée de codices principalement latins, mais également grecs, slaves et orientaux. Elle est associée à l'héritage de Fabio Chigi (1599-1667), qui devint pape en 1655 en tant qu'Alexandre VII. Dès l'adolescence, il possédait une bibliothèque à Sienne et acheta de grandes collections anciennes, dont la collection de manuscrits appartenant à la famille Piccolomini.

À la mort d'Alexandre VII, la bibliothèque, conservée au Palais Chigi (aujourd'hui Palais Odescalchi), fut encore enrichie par d'autres cardinaux de la famille.

Au cours des XVIII^e et XIX^e siècles, en revanche, le rythme de croissance de la collection, notamment en ce qui concerne les manuscrits, diminua, à l'instar de la collection Barberini. En 1764, Stefano Evodio Assemani (1711-1782) publie un index des livres imprimés de la collection.

Le début du XX^e siècle a été marqué par l'aliénation de la collection familiale de livres : le 12 mai 1918, un accord a été signé entre le ministre de l'Instruction publique du Royaume d'Italie, Agostino Berenini (1858-1939), et le prince Lucodivo Chigi (1866-1951), qui a acté le transfert de la bibliothèque Chigiana à l'État. Dans un premier temps, la bibliothèque fut « agrégée » à la bibliothèque de Casanatense. Cependant, le 28 décembre 1922, Benito Mussolini décide le transfert de la collection à la bibliothèque du Vatican, achevé le 10 février 1923.

C'est à Giuseppe Baronci, dernier bibliothécaire de la Chigiana, qu'on doit, dans les premières décennies du XX^e siècle, une série d'inventaires qui constitue encore aujourd'hui une source essentielle pour l'étude de la collection car, à l'exception de quelques catégories particulières de manuscrits, il n'en existe pas de catalogue imprimé.

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Chig.C.IV.109

Chig.C.VIII.234

Chig.L.VIII.296

Palatini

La « bibliothèque palatine » de Heidelberg est issue de la réunion – qui n'a eu lieu que lorsque la bibliothèque a été transférée à la bibliothèque du Vatican en 1622-1623 – de documents issus de diverses collections de livres de la ville allemande. Ce sont d'une part la *Schlobibliothek*, (ou Bibliothèque des électeurs palatins) et d'autre part, les collections de l'université, créées en 1386 par le prince électeur Ruprecht I (1353-1390), conservées dans les bibliothèques de la faculté des arts et des facultés de théologie, de droit et de médecine et enrichies au fil du temps par les legs des professeurs et par les électeurs palatins eux-mêmes.

L'ensemble complexe de ces bibliothèques dans lequel il est aujourd'hui difficile de distinguer clairement les noyaux appartenant à chaque institution, notamment en raison du transfert fréquent de documents d'une bibliothèque à l'autre – a connu d'importants enrichissements au XVI^e siècle.

La guerre de Trente Ans (1618-1648) est à l'origine du transfert des fonds de la bibliothèque du Palatin à Rome, à la bibliothèque du Vatican. À la suite de l'occupation de Heidelberg (1622), Maximilien Ier de Bavière (1597-1651), en échange de fonds reçus pour la poursuite de la guerre, fit don du Palatin à Grégoire XV (1621-1623), à la demande de Rome.

Les manuscrits palatins et les livres imprimés devaient être placés dans des armoires spécialement aménagées dans la bibliothèque vaticane afin que, selon les vœux de Maximilien de Bavière, le Palatin soit conservé comme une collection distincte. Cela n'a pas été complètement le cas et encore aujourd'hui on trouve des imprimés de provenance palatine, dans les actuels fonds *Aldine*, *Incunaboli*, *Membranacei*, *Raccolta Prima*, ainsi que dans les différentes sections de la *Raccolta*. À Rome, on fit recenser les manuscrits du Palatin et, à

l'exception des *Graci*, ils furent renumérotés. En 1797, lors du traité de Tolentino, Pie VI (1775-1799) est contraint d'envoyer à Paris près de 500 manuscrits de la Bibliothèque vaticane, dont 26 codices grecs et 12 codices latins des collections palatines. Les manuscrits envoyés à la Bibliothèque nationale sont pratiquement tous retournés à Rome avec la Restauration.

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Pal.lat.1071

Pal.lat.1632

Pal.lat.538

Pal.lat.540

Pal.lat.660

Reg. Lat.

La collection (2.123 pièces, mais 2113 pièces) renferme la plupart des codices latins de Christine de Suède, reine de Suède de 1644 à 1654. Sa première bibliothèque a été composée de manuscrits et de livres imprimés issus des collections royales suédoises, enrichies par le butin de guerre accumulé par le père de la reine, Gustave II Adolphe (1594-1632) durant la guerre de Trente Ans en Allemagne, en Bohême et en Moravie. Gabriel Naudé, entre autres, fut l'administrateur de sa bibliothèque.

Au moment de son abdication (juin 1654), la bibliothèque est altérée. La collection fut déplacée à Rome où Christine était arrivée en décembre 1655 dans les derniers mois de 1656. Lorsque Christine mourut, le 19 avril 1689, la collection fut vendue et le pape la récupéra. Après ces retraits et ajouts, les manuscrits qui constituent les collections actuelles sont tombés à environ 2100. Toutes les collections ont été récupérées par d'autres familles qui les ont à leur tour transmises à la BAV.

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Reg.lat.165

Reg.lat.534

Reg.lat.87

Reg.lat.99

Ross.

L'ensemble (1218 signatures, mais 1216 pièces) est composé des manuscrits de la riche collection de la bibliothèque qui incluait aussi de nombreux incunables (plus de 2500) et d'autres livres imprimés (plus de 5600) réunis par Giovanni Francesco de Rossi (1796-1854). Plus de 800 manuscrits en latin, pour la plupart des XIV^e et XV^e siècles et d'origine italienne, forment le noyau principal de la collection.

Un important ensemble (environ 200 manuscrits) est issu du collège créé à Rome par le cardinal Domenico Capranica (1400-1458) et acheté par Rossi en 1842. D'autres codices sont associés à la paroisse de Saint-François à Assise. La collection est composée de manuscrits provenant

principalement de bibliothèques italiennes, dispersées pour différentes raisons ; de nombreux manuscrits ont été achetés pour leur valeur artistique, dont des centaines de volumes finement enluminés, y compris des dizaines de livres d'heure.

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Ross.1167

Ross.379

Urbino lat.

La collection latine, qui compte 1779 signatures (1772 pièces, dont environ 70 en plusieurs volumes), est le centre de la bibliothèque d'Urbino, l'une des plus importantes et des mieux conservées des bibliothèques italiennes, qui s'est développée entre la fin de l'humanisme et l'apogée de la Renaissance, à une époque clé pour l'émergence des structures bibliothécaires. Les deux piliers de la bibliothèque d'Urbino, et plus particulièrement de sa section latine, sont l'un et l'autre : la collection originale, édifiée entre 1465 et 1480 environ par le premier duc, Federico da Montefeltro, et la collection de Francesco Maria II della Rovere.

Ce sont deux noyaux constitutifs qui se distinguent aussi sur le plan bibliographique : le premier est principalement connu pour la valeur de nombreux volumes, le second est moins connu, mais non moins important par de nombreux aspects historico-documentaires.

La bibliothèque *Federiciana*, renommée à juste titre, est une riche collection du XV^e siècle, comparable, en termes de conception et de goût, à la *Medicea*, fondement de l'actuelle *Laurenziana* de Florence, ou à la collection humaniste aragonaise, dispersée et en grande partie détruite. En effet, le niveau technique des manuscrits est élevé, tant sur le plan de l'écriture – grâce au travail de copistes comme Federico Veterani et Matteo Contugi da Volterra – que de la décoration (comme d'Attavante Attavanti 1452-1520).

La valeur des acquisitions est à souligner, même si la majorité des volumes a été copiée sur commande, voire en transcrivant des éditions imprimées. Par conséquent, cette bibliothèque est représentative d'une période bien définie, en parallèle à la réorganisation de la bibliothèque vaticane (1475-1481), à l'âge laurentien des Médicis et à la bibliothèque de Pavie, symbole des collections aristocratiques italiennes jusqu'au transfert de la collection en France après 1499 : toutes ces collections, situées au cœur de la vie intellectuelle des cours italiennes, étaient en train de devenir des bibliothèques d'État.

Les contenus sélectionnés pour Urbino mettent en évidence une unité culturelle, influencée par l'idée humaniste de la bibliothèque universelle et orientée dans ses principes fondamentaux par le chanoine Tommaso Parentucelli (1397-1455), puis Niccolo V (à partir de 1447). Par conséquent, dans la « bibliothèque sacrée », les Pères, même les plus rares, sont les plus nombreux, et parmi les théologiens, Thomas d'Aquin, le prince des « modernes », est désormais intégré. La collection des classiques païens, placée au cœur de la bibliothèque profane et égale à la philosophie aristotélicienne, apporte l'autre dimension de l'universalité.

Cependant, il y a également une multitude d'ouvrages d'humanistes latins et, en accord parfait avec ce qui se déroulait dans les mêmes années à Florence, les écrivains en langue vernaculaire, dont Dante, ont également commencé à occuper une place dans la bibliothèque. La collection des XVI^e et XVII^e siècles, élaborée à l'époque comme un prolongement du noyau humaniste et

en interaction avec une collection de livres imprimés, est tout autre. Elle apparaît comme une documentation organisée de la vie politique, diplomatique et culturelle de la cour.

Les intérêts littéraires sont encore tournés vers les textes classiques païens, mais la présence de témoins en langue vernaculaire est considérablement élargie.

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Urb.lat.1

Urb.lat.2

Urb.lat.276

Urb.lat.365

Vat. Estremi Orienti

L'inventaire des manuscrits chinois et des livres imprimés de la Bibliothèque vaticane (147 pièces) a été réalisé en 1922 par le sinologue français Paul Pelliot (1878-1945). La bibliothèque possédait déjà des manuscrits, principalement chinois, mais aussi japonais, tonkinois, annamites et mongols, dans sa collection. Le premier inventaire des « Codices Sinici » est publié en 1831 par Angelo Mai.

Les dernières acquisitions (Vat. Estr.-or. 50-115) sont attribuées à Carlo Horatii da Castorano et à l'orientaliste Giovanni Vacca (1872-1953) ou sont des dons aux papes ou à la Bibliothèque depuis 1960. Les textes sont écrits en chinois et en japonais, mais également en coréen, tibétain, birman, siamois, cinghalais, thaï ou khmer et mongol. Il ne s'agit pas uniquement de manuscrits, mais aussi d'impressions xylographiques et d'autres matériaux (peintures, sculptures de textes sur ivoire).

Enfin, la collection a connu une nette expansion (31 pièces : Vat-estr-or. 116-146) en novembre 2004, avec le transfert de la quasi-totalité des pièces qui faisaient partie depuis 1970 de la collection « provisoire Extrême-Orient du Vatican ». Les types de matériel de ce groupe comprennent, en plus des manuscrits, des peintures, des enveloppes et du papier à lettres, ainsi que des supports en papier, en soie et en bois, et les textes sont en chinois, en siamois, en japonais et en laotien.

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Vat estr.or.148

Vat estr.or.159

Vat gr.

La collection (2672 signatures, mais 2649 pièces) est le fruit de stratifications complexes, qui remontent au XV^e siècle et s'étendent jusqu'à nos jours. Elle est classée en pas moins de 18 parties.

Pour le projet d'intelligence artificielle nous avons surtout travaillé sur les *Codices* du Collège Grec. La Bibliothèque vaticane a reçu ces 197 manuscrits entre 1611 et 1622, pratiquement tous sous le pontificat de Paul V (1605-1621) et une petite partie sous celui de Grégoire XV (1621-1623).

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Vat.gr.1613

Vat.gr.1927

Vat.gr.333

Vat.gr.699

Vat.gr.746.pt.1

Vat.gr.746.pt.2

Vat.gr.747

Vat.gr.751

Vat.gr.752.pt.1

Vat Lat.

La collection (15 379 signatures, mais 15 265 pièces) trouve ses origines dans la création même de la Bibliothèque vaticane à l'époque humaniste, avec le retour des papes à Rome après le Grand Schisme (1378-1415) qui a marqué le début d'une nouvelle phase des collections de livres pontificaux, après la destruction ou la dispersion des précédentes. Étant donné l'histoire, l'étendue et la stratification complexe de la collection, il n'est actuellement possible que d'en dresser une carte chronologiquement séparée en trois zones.

La première zone se termine par le transfert de la bibliothèque de son emplacement initial au rez-de-chaussée de l'aile du XV^e siècle du Palais apostolique – l'ancienne bibliothèque de Nicolas V (1447-1455) et de Sixte IV (1471-1484), aujourd'hui ancienne salle du synode – aux nouvelles salles érigées au nom de Sixte V (1585-1590). Les adhésions de Paul V (1605-1621) à Pie IX (1846-1878) sont incluses dans la deuxième zone. Le développement récent de Léon XIII (1878-1903) jusqu'à nos jours constitue la troisième zone.

Manuscrits utilisés lors du projet d'IA :

Vat.lat.1202

Vat.lat.14701

Vat.lat.20

Vat.lat.330

Bibliographie :

Numérique et Histoire de l'art :

CLAVERT (Frédéric), DANIEL (Johanna), FLECKINGER (Hélène) et al., « Histoire et humanités numériques : nouveaux terrains de dialogue entre les archives et la recherche », *La Gazette des archives*, vol. 245, n° 1 (2017), p. 121-134. URL : https://www.persee.fr/doc/gazar_0016-5522_2017_num_245_1_5519. Consulté le 3 août 2024.

COURTIN (Antoine), « Digital Art History: une tentative de définition », *Medium*, 10 octobre 2016. URL : <https://medium.com/@seeksanusername/digital-art-history-une-tentative-de-d%C3%A9finition-6b3c3f288683..>. Consulté le 3 août 2024.

DICKEY (Erin), « Digital Art History | Artists' Studio Archives », 21 mars 2016. URL : <https://artiststudioarchives.org/tag/digital-art-history/>. Consulté le 3 août 2024.

DRUCKER (Johanna), « Is There a “Digital” Art History? », *Visual Resources*, vol. 29, n° 1-2 (juin 2013), p. 5-13. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01973762.2013.761106>. Consulté le 3 août 2024.

SINATRA (Michaël E.) et VITALI-ROSATI (Marcello), « Chapitre 3. Histoire des humanités numériques », dans *Pratiques de l'édition numérique*, éd. M.E. Sinatra, Montréal, 2014 (Parcours numérique), p. 49-60. URL : <https://books.openedition.org/pum/317>. Consulté le 31 août 2024. ISBN : 9782821850729.

« La géométrie de la cathédrale gothique de Beauvais : tracé directeur », *Les Cathédrales retracées* [s.d.]. URL : <https://www.cathedrales-gothiques.com/templates/la-geometrie-de-la-cathedrale-gothique-de-beauvais-trace-directeur-23>. Consulté le 31 août 2024.

« Les entretiens autour de l'informatique », *Le Monde*, 10 décembre 2014. URL : <https://www.lemonde.fr/blog/binaire/les-entretiens-de-la-sif/>. Consulté le 31 août 2024.

Émergence de l'intelligence artificielle au service du patrimoine :

ARNOLD (Taylor) et TILTON (Lauren), *Distant viewing : computational exploration of digital images*, Cambridge, Massachusetts, 2023. ISBN : 9780262375160.

BENSAMOUN (Alexandra), FARCHY (Joëlle), « Mission intelligence artificielle et culture : rapport final», Ministère de la Culture, Conseil supérieur de la propriété littéraire et artistique, 27 janvier 2021, URL : <https://www.enssib.fr/bibliotheque-numerique/notices/69406-mission-intelligence-artificielle-et-culture-rapport-final>. Consulté le 3 août 2024.

BERMES (Emmanuelle), LECLAIRE (Céline), MOREUX (Jean-Philippe), « L'image comme particule élémentaire, ou les prémisses d'un changement d'échelle à la BnF », *The Measurement of Images. Computational Approaches in the History and Theory of the Arts*, sous la direction de Clarisse Bardiot et Emmanuel Château-Dutier, Presses

universitaires du Septentrion, A paraître, Humanités numériques et science ouverte. URL : <https://hal.science/hal-03991515/document> Consulté le 28 août 2024.

BERMES (Emmanuelle) et LECLAIRE (Céline), « Vers l'intelligence artificielle et au-delà ! Une feuille de route pour la BnF », *Arabesques*, n° 107 (octobre 2022), p. 8-9. URL : <https://publications-prairial.fr/arabesques/index.php?id=3082..> Consulté le 3 août 2024.

BERMES (Emmanuelle) et MOIRAGHI (Eleonora), « Le patrimoine numérique national à l'heure de l'intelligence artificielle. Le programme de recherche Corpus comme espace d'expérimentation pour les humanités numériques », *Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle*, vol. 1, n° 1 (2020), p. 89. URL : <https://bnf.hal.science/hal-02122073..> Consulté le 3 août 2024.

BENZAKI (Younes), « Overfitting et Underfitting : Quand vos algorithmes de Machine Learning dérapent ! », *Mr. Mint : Apprendre le Machine Learning de A à Z*, 11 juillet 2017. URL : <https://mrmint.fr/overfitting-et-underfitting-quand-vos-algorithmes-de-machine-learning-derapent>. Consulté le 5 août 2024.

Bibliothèque nationale de France, « Enjeux juridiques et éthiques / AI & GLAM collections: legal & ethical challenges to sharing GLAMs collections », [s.d.]. URL : <https://www.bnf.fr/fr/mediatheque/enjeux-juridiques-et-ethiques-ai-glam-collections-legal-ethical-challenges-sharing..> Consulté le 2 septembre 2024.

« Définition et Histoire - Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ? », *Intelligence artificielle & Data Analytics*, Coheris, [s.d.]. URL : <https://ia-data-analytics.fr/intelligence-artificielle/>. Consulté le 3 août 2024.

« Intelligence artificielle », dans *Wikipédia*, 2 septembre 2024. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Intelligence_artificielle&oldid=218276741.. Consulté le 3 septembre 2024.

« L'Intelligence Artificielle face au test de Turing - Coheris », *Intelligence artificielle & Data Analytics*, Coheris, 21 novembre 2019. URL : <https://ia-data-analytics.fr/intelligence-artificielle/test-turing/>. Consulté le 31 août 2024.

« Qu'est-ce que la Data Science ? », Saagie, 28 avril 2021. URL : <https://www.saagie.com/fr/blog/qu-est-ce-que-la-data-science/>. Consulté le 31 août 2024.

« Qu'est-ce que le Machine Learning ou apprentissage automatique ? », *Intelligence artificielle & Data Analytics*, Coheris, [s.d.]. URL : <https://ia-data-analytics.fr/machine-learning/..> Consulté le 31 août 2024.

« Réseau de neurones convolutif», Data Analytics Post, [s.d.]. URL : <https://dataanalyticspost.com/Lexique/reseau-de-neurones-convolutifs/>. Consulté le 31 août 2024.

« Stanford University CS231n: Deep Learning for Computer Vision », Data Analytics Post, [s.d.]. URL : <https://cs231n.stanford.edu/>. Consulté le 31 août 2024.

Projets d'intelligence artificielle appliquée à des collections patrimoniales en France et à l'international :

Bibliothèque nationale de France, « Les Futurs Fantastiques » – Les défis de l'IA dans les galeries, bibliothèques, archives et musées », 3^e conférence internationale sur l'intelligence artificielle, Bibliothèque nationale de France, Université Paris Saclay, 8-10 décembre 2021. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=4CFDdGmlGk>. Consulté le 3 août 2024.

CARRÉ (Marion), « Conférence introductory, Que peut l'art pour l'intelligence artificielle ? » *Fantastiques futurs*, Paris, Bibliothèque nationale de France, jeudi 9 décembre 2021, URL : <https://www.inoreader.com/search/feeds>. Consulté le 2 septembre 2024.

DARBY (Andrew), COLEMAN (Catherine Nicole), ENGEL (Claudia) et al., *AI training resources for GLAM: a snapshot*, 10 mai 2022. URL : <http://arxiv.org/abs/2205.04738>. Consulté le 3 août 2024.

LECLAIRE (Céline), « Les futurs Fantastiques », 3 février 2022. URL : https://bbf.enssib.fr/tour-d-horizon/les-futurs-fantastiques_70324. Consulté le 31 août 2024.

« IFLA Statement on Libraries and Artificial Intelligence », (Committee on Freedom of Access to Information and Freedom of), (octobre 2020). URL : <https://repository.ifla.org/handle/123456789/1646>. Consulté le 3 août 2024.

MOIRAGHI (Eleonora), « Explorer des corpus d'images. L'IA au service du patrimoine », Billet, *Carnet de la recherche à la Bibliothèque nationale de France*, 16 avril 2018. URL : <https://bnf.hypotheses.org/2809>. Consulté le 3 août 2024.

« Bases de données iconographiques et l'intelligence artificielle | Canal U », 24 mai 2023. URL : <https://www.canal-u.tv/chaines/enc/bases-de-donnees-iconographiques-et-l-intelligence-artificielle>. Consulté le 3 août 2024.

« Et demain ? Intelligence artificielle et musées », ICOM France, 27 octobre 2023. URL : <https://www.icom-musees.fr/actualites/et-demain-intelligence-artificielle-et-musees-0>. Consulté le 3 août 2024.

« GallicaPix, un nouvel outil d'exploration iconographique | Le blog de Gallica », [s.d.]. URL : <https://gallica.bnf.fr/blog/21062021/gallicapix-un-nouvel-outil-dexploration-iconographique?mode=desktop>. Consulté le 3 août 2024.

« Mandragore : jeu d'images annotées sur le thème de la zoologie | Api », [s.d.], URL : <https://api.bnf.fr/fr/mandragore-jeu-dimages-annotees-sur-le-theme-de-la-zoologie>. Consulté le 31 août 2024.

« Quelques projets d'intelligence artificielle en cours à la BnF », *BnF - Site institutionnel*, [s.d.]. URL : <https://www.bnf.fr/fr/quelques-projets-dintelligence-artificielle-en-cours-la-bnf>. Consulté le 3 août 2024.

« Saint George on a Bike : Quand l'Intelligence Artificielle améliore la compréhension des œuvres d'art », ActuIA, [s.d.]. URL : <https://www.actuia.com/actualite/saint-george-on>

a-bike-quand-l'intelligence-artificielle-ameliore-la-comprehension-des-oeuvres-d-art/. Consulté le 31 août 2024.

« SIAMESE | KB LAB », National Library of the Netherlands, [s.d.]. URL : <https://lab.kb.nl/tool/siamese>. Consulté le 31 août 2024

Exemples concrets d'utilisation de l'intelligence artificielle sur des collections patrimoniales :

BOROS (Emanuela), TOUMI (Alexis), ROUCHET (Erwan) et al., « Automatic Page Classification in a Large Collection of Manuscripts Based on the International Image Interoperability Framework », dans *2019 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, Sydney, Australia, IEEE, septembre 2019. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8978196/>. Consulté le 5 août 2024.

BOTTCHER (Sophie), « Voir l'invisible : l'intelligence artificielle au service de la restauration d'œuvres d'arts », *Contrepoints*, 24 juin 2024. URL : <https://mastersts.hypotheses.org/10892>. Consulté le 5 août 2024.

CASCOME (Sarah) « A Neuroscientist and a Physicist Used A.I. to Recreate a Lost Painting Buried Under a Beloved Picasso Canvas », *Artnet News*, 8 avril 2021. URL : <https://news.artnet.com/art-world/lost-painting-under-picasso-masterpiece-recreated-as-an-nft-1957407>. Consulté le 2 septembre 2024.

COSTANTINI (Valentine), « Le pari de l'intelligence artificielle dévoilera les secrets de textes anciens », *ActuaLitté.com*, [s.d.]. URL : <https://actualitte.com/article/101857/livres-anciens/le-pari-de-l-intelligence-artificielle-devoilera-les-secrets-de-textes-anciens>. Consulté le 5 août 2024.

École nationale des chartes - PSL, Journée de l'Ademec : « IA et institutions patrimoniales », *Chercher dans les grands corpus d'images à travers l'IA*, 29 janvier 2020. URL : https://www.youtube.com/watch?v=ndT3NLPeQFM&list=PLayqwLSo_nPW1wHnVw-gJPwMya4gYBPe0&index=3. Consulté le 5 août 2024.

École nationale supérieure des sciences de l'information et des bibliothèques, « Aide à la décision pour la conservation et la gestion des collections », dans *Le Printemps des métiers / 1, 2, 3... IA ! Intelligence artificielle, métiers et compétences*, 11 mai 2023, URL : <https://www.enssib.fr/bibliotheque-numerique/notices/71190-l-aide-a-la-decision-pour-la-conservation-et-la-gestion-des-collections>. Consulté le 5 août 2024.

ERDMANN (Robert) « The Night Watch project: painting restoration (Rijksmuseum); watermarks analysis on ancient paper », *AI4LAM Community Call, 19 April 2022, Content Generative Models and GLAM*. URL : https://www.youtube.com/watch?v=PjuuTi_1puM Consulté le 2 septembre 2024.

Institut national d'histoire de l'art, #LundisNum / 8 janvier 2018 - Isabella Di Lenardo et Benoit Seguin : projet Replica, 9 janvier 2018. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=JxFMEAokjTM>. Consulté le 5 août 2024.

HAKOUN (Agathe), « Découpée il y a 300 ans, La Ronde de nuit de Rembrandt reconstituée grâce à l'intelligence artificielle », *Connaissance des Arts*, 25 juin 2021. URL : <https://www.connaissancesdesarts.com/musees/rijksmuseum/dcoupee-il-y-a-300-ans-la-ronde-de-nuit-de-rembrandt-reconstituee-grace-a-lintelligence-artificielle-11159499/>. Consulté le 2 septembre 2024.

MARINESCU (Maria-Cristina), RESHETNIKOV (Artem) et LOPEZ (Joaquim More), « Improving object detection in paintings based on time contexts », dans *2020 International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, Sorrento, Italy, IEEE, novembre 2020. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9346513/>. Consulté le 5 août 2024.

OURY (Antoine), « IndIAna Jones ? Une machine déchiffre un rouleau calciné », *ActuaLitté.com*, [s.d.]. URL : <https://actualitte.com/article/113896/livres-anciens/indiana-jones-une-machine-dechiffre-un-rouleau-calcine>. Consulté le 5 août 2024.

PERESAN-ROUDIL (Delphine), « Le noir de Judée : coupable de l'assombrissement du “Radeau de la Méduse” ? », *Beaux-Arts*, 3 janvier 2024. URL : <https://www.beauxarts.com/grand-format/le-noir-de-bitume-coupable-de-lassombrissement-du-radeau-de-la-meduse/>. Consulté le 2 septembre 2024.

SCHEN (Xi), EFROS (Alexei A.) et AUBRY (Mathieu), « Discovering Visual Patterns in Art Collections With Spatially-Consistent Feature Learning », dans *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Long Beach, CA, USA, IEEE, juin 2019. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8954148/>. Consulté le 5 août 2024.

TESTINO (Arianna), « Lo scanner più veloce al mondo, a Venezia. Presentato alla Fondazione Cini il rivoluzionario Replica 360rv: che digitalizza l'intera fototeca dell'Istituto di Storia dell'Arte | Artribune », 17 février 2016. URL : <https://www.artribune.com/tribnews/2016/02/lo-scanner-piu-veloce-al-mondo-a-venezia-presentato ALLA fondazione cini il rivoluzionario replica 360rv che digitalizza l'intera fototeca dell'Istituto di Storia dell'Arte/>. Consulté le 2 septembre 2024.

VALLAS (Philippe), « Prédire l'état matériel des documents : Dalgocol, un programme de recherche en intelligence artificielle à la BnF », *Bulletin des Bibliothèques de France*, 15 juin 2022. URL :<https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2022-00-0000-008>. Consulté le 5 août 2024.

« Fondazione Giorgio Cini Onlus – Il sito della Fondazione Giorgio Cini. L'offerta culturale, gli eventi, le biblioteche, le visite guidate. », [s.d.]. URL : <https://www.cini.it/>. Consulté le 2 septembre 2024.

« Getty Union List of Artist Names (Research at the Getty) », [s.d.]. URL : <https://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/ulan>. Consulté le 2 septembre 2024.

« Vesuvius Challenge », [s.d.]. URL : <https://scrollprize.org..> Consulté le 2 septembre 2024.

Utilisation de l'IA sur les fonds de la BAV :

LIN (Tsung-Yi), MAIRE (Michael), BELONGIE (Serge) et al., *Microsoft COCO: Common Objects in Context*, 20 février 2015. URL : <http://arxiv.org/abs/1405.0312>. Consulté le 5 août 2024.

MAINI (Vishal), « Machine Learning for Humans, Part 4: Neural Networks & Deep Learning », *Machine Learning for Humans*, 28 mai 2018. URL : <https://medium.com/machine-learning-for-humans/neural-networks-deep-learning-cdad8aeae49b>. Consulté le 5 août 2024.

REDMON (Joseph), DIVVALA (Santosh), GIRSHICK (Ross) et al., *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*, 9 mai 2016. URL : <http://arxiv.org/abs/1506.02640>. Consulté le 5 août 2024.

Enjeux et évolutions de la recherche en Sciences humaines:

BERMES (Emmanuelle), « Les moteurs de recherche : petit précis de mécanique à l'usage des bibliothèques numériques », Bulletin des bibliothèques de France (BBF), 2007, n°6, p. 5-10. URL : <https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2007-06-0005-001>. Consulté le 2 septembre 2024.

BERMES (Emmanuelle), « « L'évolution du modèle d'agrégation de données dans les bibliothèques numériques », *Figoblog*, 25 mars 2016. URL : <https://figoblog.org/2016/03/25/levolution-du-modele-dagregation/>. Consulté le 2 septembre 2024.

Bibliothèque nationale de France « Penser la découvrabilité des contenus culturels », 20 juin 2023. URL : <https://www.bnf.fr/fr/agenda/penser-la-decouvrabilite-des-contenus-culturels>. Consulté le 12 août 2024.

Bibliothèque nationale de France « METS : Metadata Encoding and Transmission Standard », [s.d.]. URL : <https://www.bnf.fr/fr/mets-metadata-encoding-and-transmission-standard>. Consulté le 2 septembre 2024.

BOUVIER (Anne), « L'IA à la Bibliothèque nationale de France : la patrimonialisation 4.0 », *La Jaune et la Rouge*, 2 janvier 2023. URL : <https://www.lajauneetlarouge.com/ia-a-la-bnf-la-patrimonialisation-4-0/>. Consulté le 12 août 2024.

BURNARD (Lou), « La TEI et le XML », dans *Qu'est-ce que la Text Encoding Initiative ?*, Marseille, 2015 (Encyclopédie numérique). URL : <https://books.openedition.org/oep/1298>. Consulté le 12 août 2024. ISBN : 9782821855816.

ERTZSCHEID (Olivier) et GALLEZOT (Gabriel) « Chercher faux et trouver juste : Serendipité et recherche d'information », 2003 URL : <https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/file/index/docid/62272/filename/index.html>. Consulté le 2 septembre 2024.

FURNER (Jonathan), « User tagging of library resources: Toward a framework for system evaluation» University of California Los Angeles, Etats-Unis, 2007

<https://www.researchgate.net/publication/238393988> User tagging of library resources Toward a framework for system evaluation. Consulté le 2 septembre 2024.

Institut national d'histoire de l'art, « DAH@INHA », 15 juin 2016. URL : <https://www.inha.fr/fr/agenda/parcourir-par-annee/en-2016/juin-2016/rencontre-autour-de-la-digital-art-history.html>. Consulté le 12 août 2024.

Institut national d'histoire de l'art, « L'Atlas Mnemosyne », 4 décembre 2012. URL : <https://www.inha.fr/fr/ressources/publications/collections-imprimees/collection-sources-pour-l-histoire-de-l-art/l-atlas-mnemosyne.html>. Consulté le 12 août 2024.

LO (Leo S.) et VITALE (Cynthia Hudson), *Evolving AI Strategies in Libraries: Insights from Two Polls of ARL Member Representatives over Nine Months*, 28 mars 2024. URL : <https://www.arl.org/resources/evolving-ai-strategies-in-libraries-insights-from-two-polls-of-arl-member-representatives-over-nine-months/>. Consulté le 2 septembre 2024.

MORARD (Martin), « Terminologie ancienne | Libraria », 25 août 2021. URL : <https://libraria.hypotheses.org/category/terminologie>. Consulté le 12 août 2024.

ROBINEAU (Régis), « Comprendre IIIF et l'interopérabilité des bibliothèques numériques », *Insula*, 8 novembre 2016. URL : <https://insula.univ-lille.fr/2016/11/08/comprendre-iiif-interoperabilite-bibliotheques-numeriques/>. Consulté le 12 août 2024.

ROBINEAU (Régis), « Introduction aux protocoles IIIF » (février 2019). URL : <https://zenodo.org/record/3760306..> Consulté le 2 septembre 2024.

« Artl@s | database », [s.d.]. URL : <https://artlas.huma-num.fr/map/#/>. Consulté le 12 août 2024.

« Comment penser la promotion de contenus culturels ? (1/2) », [s.d.]. URL : <https://www.810.fr/blog-posts/rex-bnf-decouvrabilite-contenus-culturels-1>. Consulté le 2 septembre 2024.

« Generating IIIF Manifests from Repository Metadata and Archival Metadata (EAD)», [s.d.]. URL : <https://iiif.io/event/2018/washington/program/paper-1/>. Consulté le 12 août 2024.

« Glossaires Codicologiques », [s.d.]. URL : <https://codicologia.irht.cnrs.fr/>. Consulté le 12 août 2024.

« Guidelines – TEI: Text Encoding Initiative », [s.d.]. URL : <https://tei-c.org/guidelines/>. Consulté le 12 août 2024.

« Identifiants pérennes pour les ressources numériques », 11 décembre 2015. URL : <https://www.culture.gouv.fr/espace-documentation/Publications-revues/Identifiants-perennes-pour-les-ressources-numeriques>. Consulté le 12 août 2024.

« IIIF Discovery Technical Specification Group », [s.d.]. URL : <https://iiif.io/community/groups/discovery/>. Consulté le 2 septembre 2024.

« Portail Biblissima », IRHT - CNRS, [s.d.]. URL : <https://www.irht.cnrs.fr/fr/ressources/sites->

web-outils-corpus/biblissima. Consulté le 12 août 2024.

« Web sémantique : outils pratiques », [s.d.]. URL : <https://www.culture.gouv.fr/Tematiques/innovation-numerique/Faciliter-l-acces-aux-donnees-et-aux-contenus-culturels/Web-semantique-outils-pratiques>. Consulté le 12 août 2024.

« Transitioning to a Digital World: Art History, Its Research Centers, and Digital Scholarship | Samuel H. Kress Foundation », [s.d.]. URL : <https://www.kressfoundation.org/Resources/Sponsored-Research/Research-Items/Transitioning-to-a-Digital-World>. Consulté le 12 août 2024.

« 2017 IIIF Conference in The Vatican », *Eventbrite*, [s.d.]. URL : <https://www.eventbrite.com/e/2017-iiif-conference-in-the-vatican-tickets-31523612975>. Consulté le 12 août 2024.

Médiation et Intelligence artificielle :

CHARRAIRE (Fabienne), « Press Start 2021 : Les bestiaires du jeu vidéo », Dossier, Balises - Le magazine de la Bpi, 14 septembre 2021. URL : <https://balises.bpi.fr/ark:/34201/ds10040731t>. Consulté le 2 septembre 2024.

BELL (Larryn), « Assassin's Creed Mirage Release Date and Gameplay Revealed », *Guide Stash*, 25 mai 2023. URL : <https://www.guidestash.com/news/assassins-creed-mirage/assassins-creed-mirage-release-date-and-gameplay-revealed/>. Consulté le 2 septembre 2024.

Bibliothèque publique d'information, « Au programme de Press Start 2021 » (septembre 2021). URL : <https://www.bpi.fr/ark:/34201/tx10040696t>. Consulté le 12 août 2024.

WOODROW (Ryan), « Assassin's Creed Mirage map size: how big is Baghdad? », *Video Games on Sports Illustrated*, 29 novembre 2023. URL : <https://www.si.com/videogames/guides/assassins-creed-mirage-map-size>. Consulté le 2 septembre 2024.

« Airbus fait décoller sa réalité mixte vers le métavers », *LeMagIT*, [s.d.]. URL : <https://www.lemagit.fr/etude/Airbus-fait-decoller-sa-realite-mixte-vers-le-metavers>. Consulté le 2 septembre 2024.

« Armarium Hauts de France - Exposition virtuelle - Sublimes animaux », [s.d.]. URL : <https://expo.armarium-hautsdefrance.fr/sublimes-animaux>. Consulté le 2 septembre 2024.

« AskMona », [s.d.]. URL : <https://www.askmona.fr/>. Consulté le 2 septembre 2024.

« Bagdad : redécouvrir Madinat al-Salam, avec Assassin's Creed® Mirage », *Institut du monde arabe*, 19 janvier 2024. URL : <https://www.imarabe.org/fr/expositions/bagdad-redécouvrir-madinat-al-salam-avec-assassin-s-creedr-mirage>. Consulté le 12 août 2024.

« Exposition Animaux fantastiques », Louvre-Lens, [s.d.]. URL :

<https://www.louvrelens.fr/exhibition/animaux-fantastiques/>. Consulté le 2 septembre 2024.

« Fabricabrac | Editions de la Bibliothèque nationale de France », [s.d.]. URL : <https://editions.bnf.fr/fabricabrac>. Consulté le 12 août 2024.

« Inkulinati - Official Teaser Trailer», [s.d.]. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=1OyQCSxNR50>. Consulté le 12 août 2024.

« Jean Jouberton : Dans *A plague tale*», [s.d.]. URL : https://fr.linkedin.com/posts/jeanjouberton_histoire-de-l-art-jeu-vid%C3%A9o-dans-%3F-activity-7142838510025150464-mD67. Consulté le 2 septembre 2024.

Codicologie, sources historiques et bestiaires médiévaux :

AGATI (Maria Luisa), *Il libro manoscritto da Oriente a Occidente: per una codicologia comparata*, Studia archaeologica (Roma), n°166, Rome, L'Erma di Bretschneider, 2009 (1ère éd., 2003). Z105 .A318 2009. ISBN : 9788882655136.

AGATI (Maria Luisa), *Il libro manoscritto: introduzione alla codicologia*, Roma, 2003 (Studia archaeologica, n° 124). Z105 .A32 2003. ISBN : 9788882652524.

BOZZOLO (Carla) et ORNATO (Ezio), *Pour une histoire du livre manuscrit au Moyen Age: trois essais de codicologie quantitative*, Paris, Éd. du Centre national de la recherche scientifique, 1980 (Textes et études / Equipe de recherche sur l'humanisme français des XIV^e et XV^e siècles, n° 2). Z107 .B69 1980. ISBN : 9782222027126.

CASSAGNES-BROUQUET (Sophie), *La passion du livre au moyen âge*, Rennes, 2003 (Histoire / Éditions Ouest-France). Z8.F8 C37 2003. ISBN : 9782737330186.

D'AIUTO (Francesco) et VIAN (Paolo), *Guida ai fondi manoscritti, numismatici, a stampa della Biblioteca vaticana*, Città del Vaticano, 2011 (Studi e testi, n° 466-467). ISBN : 9788821008849.

DEROLEZ (Albert), *Codicologie des manuscrits en écriture humanistique sur parchemin*, Turnhout, 1984 (Bibliologia, n° vols. 5-6). Z115.I8 D48 1984. ISBN : 9782503780054.

HARRSEN (Meta) et BOYCE (George K.), *Italian manuscripts in the Pierpont Morgan Library : descriptive survey of the principal illuminated manuscripts of the sixth to sixteenth centuries, with a selection of important letters and documents*, éd. New York : sn, 1953.

HECK (Christian) et CORDONNIER (Rémy), *Le bestiaire médiéval: l'animal dans les manuscrits enluminés*, Paris, Citadelles & Mazenod, 2018. 741.647 0902. ISBN : 9782850887239.

KILLERMANN (Matthias Sebastian), *Das Tierbuch des Petrus Candidus geschrieben 1460, gemalt im 16. Jahrhundert. (Codex Vaticanus Urb. lat. 276.)*, 1914. (https://www.zobodat.at/biografien/Montagu_George_Zoologische_Annalen_6_0113-0221.pdf). Consulté le 12 mai 2024.

LATIMIER-IONOFF (Adeline), PAVLEVSKI-MALINGRE (Joanna) et SERVIER (Alicia), *Merveilleux et marges dans le livre profane à la fin du Moyen Age (XII^e-XV^e siècles)*, Turnhout, 2017 (Les Études du RILMA (ETRILMA), n° 8). ISBN : 9782503569178.

LLUCH-BAIXAULI (Miguel), « Jacques LEMAIRE, Introduction à la Codicologie, (« Publications de l’Institut d’Études Médiévales », 9), Louvain-la-Neuve 1989, 266 pp., 13,5 x 22. », *Scripta Theologica*, vol. 23, n° 3 (février 2018), p. 1078. URL : <https://revistas.unav.edu/index.php/scripta-theologica/article/view/18231..> Consulté le 29 août 2024.

MANIACI (Marilena), *Terminologia del libro manoscritto*, Roma, 1996 (Addenda, n° 3). Z111 .M16 1996. ISBN : 9788870754674.

MANIACI (Marilena), FEDERICI (Carlo) et ORNATO (Ezio), *Archeologia del manoscritto: metodi, problemi, bibliografia recente*, 1. ed, Roma, 2002 (I libri di Viella, n° 34). Z6602 .M357 2002. ISBN : 9788883340819.

MATHIS (Rémi), SUEUR-HERMEL (Valérie), *Animal*, éd. Bibliothèque nationale de France, Paris, Bibliothèque nationale de France, 2014. N7660 .B496 2014. ISBN : 9782717726152.

PASTOUREAU (Michel), *L’historien face à l’animal: l’exemple du Moyen Âge*, éd. École nationale des chartes, Paris, 2023 (Collection « Propos »). D116 .P37 2023. ISBN : 9782357231818.

PASTOUREAU (Michel), *Bestiaires du Moyen âge*, éd. Seuil, Paris, 2019. ISBN : 9782021414097.

PIAZZONI (Ambrogio M.), RITA (Andreina), trad. inglese di T. Janz, *Bibliotheca apostolica Vaticana*, éd Città del Vaticano, Bibliothèque apostolique vaticane, 2019.

Ancient and medieval book materials and techniques: Erice, 18-25 September 1992, éd. M. Maniaci, P. Munafò, Città del Vaticano, Biblioteca apostolica vaticana, 1993 (Studi e testi, n° 357-358). Z112 .A53 1993. ISBN : 9788821006500.

La fabbrica del codice: materiali per la storia del libro nel tardo medioevo, éd. P. Busonero, 1. ed, Roma, Viella, 1999 (I libri di Viella, n° 14). Z107 .F33 1999. ISBN : 9788885669758.

La face cachée du livre médiéval: l’histoire du livre, éd. E. Ornato, C. Bozzolo, 1. ed, Roma, Viella, 1997 (I libri di Viella, n° 10). Z8.E9 F33 1997. ISBN : 9788885669550.

Recherches de codicologie comparée: la composition du codex au Moyen Age, en Orient et en Occident, éd. P. Hoffmann, C. Hunzinger, Paris, Presses de l’Ecole normale supérieure, 1998 (Collection bibliologie). Z105 .R433 1998. ISBN : 9782728802319.

Projets numériques de la Bibliothèque apostolique vaticane :

MANONI (Paola), « L’adozione del IIIF nell’ecosistema digitale della Biblioteca Apostolica Vaticana », *DigItalia*, vol. 15, no 2, (décembre 2020), p. 96-105. URL : <https://digitalia.cultura.gov.it/article/view/2632>. Consulté le 2 septembre 2024.

MANONI (Paola) et PONZI (Eva) « Thematic Pathways on the Web: IIIF annotations of manuscripts from the Vatican collections: il “Progetto Mellon” della Biblioteca Vaticana. La storia della miniatura incontra lo Spotlight », *Rivista di storia della miniatura* 24, 2020, p. 211-216.

Stanford University Libraries Digital Library Systems & Services, SpotlightServiceCommunityCall demo 8Nov2019, 2019, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Zt0wQsGMPjc&t=1s>. Consulté le 02 septembre 2024.

« DigiVatLib-Vatican Library », [s.d.]. URL : <https://digi.vatlib.it/>. Consulté le 2 septembre 2024.