

UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE
CENTRE DE RECHERCHE HiCSA (Histoire culturelle et sociale
de l'art - EA 4100)

HiCSA Éditions en ligne

LES FILIGRANES, UNE MARQUE À EXPLORER

ACTES DE LA JOURNÉE D'ÉTUDE
DU 20 OCTOBRE 2018

HISTOIRE DU PAPIER ET DE LA PAPETERIE – ACTUALITÉS DE LA RECHERCHE

ACTES DE LA JOURNÉE D'ÉTUDE
DU 11 OCTOBRE 2019

Édités sous la direction de Claude Laroque

EXPLORER LES MATÉRIALITÉS DU PAPIER GRÂCE
AUX OUTILS D'IMAGERIE ET D'INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE AU RIJKSMUSEUM, MÉTHODOLOGIE
ET RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES
LEILA SAUVAGE ET MARIE-NOËLLE GRISON

Pour citer cet article

Leila Sauvage et Marie-Noëlle Grison, « Explorer les matérialités du papier grâce aux outils d'imagerie et d'intelligence artificielle au Rijksmuseum, méthodologie et résultats préliminaires », dans Claude Laroque (dir.), Valérie Lee, Maryse Pierrard, Actes des journées d'étude *Les filigranes, une marque à explorer* (organisée le 20 octobre 2018) et *Histoire du papier et de la papeterie – Actualités de la recherche* (organisée le 11 octobre 2019), Paris, site de l'HiCSA, mis en ligne en novembre 2020, p. 238-257.

ISBN : 978-2-491040-06-2

EXPLORER LES MATÉRIALITÉS DU PAPIER GRÂCE AUX OUTILS D'IMAGERIE ET D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE AU RIJKSMUSEUM, MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

LEILA SAUVAGE

Conservatrice-restauratrice d'œuvres d'art graphique et chercheuse en sciences du patrimoine, Rijksmuseum-TU Delft,

MARIE-NOËLLE GRISON

Historienne de l'art, chargée de recherches au département des dessins et estampes, Rijksmuseum

La dématérialisation des œuvres et documents sur papier (dessins, estampes, livres, archives), par l'intermédiaire de bases de données institutionnelles, a révolutionné le quotidien des chercheurs en facilitant l'accès à des collections dispersées dans le monde. Mais par le procédé même, elle a aussi eu pour effet *dé*-matérialiser l'objet, de le réduire à un tracé écrit ou dessiné. Or, le support, le papier est en soi aussi riche d'informations que l'image ou le texte qu'il porte. Parce qu'il contribue à la remise en contexte historique et culturelle de l'objet, il est une ressource essentielle aussi bien pour le conservateur-restaurateur que pour l'historien (d'art)¹.

Pourtant, si une terminologie précise et cohérente des techniques graphiques a récemment vu le jour², la matérialité du papier au sens large n'a jamais fait l'objet d'une attention systématique ni approfondie. Les conservateurs-restaurateurs mentionnent en termes généraux, dans leurs constats d'état ou rapports d'intervention, le type de papier (préindustriel ou machine, vergé

1 Hazem Hiary et Kia Ng ("A system for segmenting and extracting paper-based watermark designs", *International Journal on Digital Libraries*, Volume 6, n° 4, juillet 2007, p. 352) en faisaient déjà le constat en 2007. Publication en ligne : https://www.researchgate.net/publication/220387587_A_system_for_segmenting_and_extracting_paper-based_watermark_designs.

2 Nancy Ash et al., *Descriptive Terminology for Works of Art on Paper*, Philadelphia Museum of Art, 2014. Publication en ligne : https://www.philamuseum.org/doc_downloads/conservation/DescriptiveTerminologyforArtonPaper.pdf.

ou vélin) et la présence éventuelle d'un filigrane, mais cette caractérisation demeure insuffisante. En ce qui concerne le papier occidental préindustriel, la littérature disponible se limite à des monographies, à des études de cas de conservation-restauration ou à des répertoires de filigranes imprimés et en ligne. La filigranologie, pour sa part, s'est distinguée depuis le ^{xix}^e siècle comme une discipline autonome, presque trop isolée de l'étude des autres caractéristiques physiques du papier. La connaissance des filigranes, indices précieux pour tenter d'identifier et dater un papier, reste encore aujourd'hui le principal outil méthodologique à la disposition des chercheurs en codicologie, histoire de l'art et histoire du livre³. Mais dans le cas — encore plus fréquent lorsqu'il s'agit de dessins et estampes — où le papier étudié ne comporte qu'un fragment de filigrane, voire aucun, les pistes de recherche s'en trouvent singulièrement restreintes. Pour surmonter cela, il est nécessaire d'établir une méthodologie permettant d'étudier d'autres caractéristiques du papier, qui sont tout aussi parlantes à condition d'être correctement relevées et interprétées⁴.

Le but du présent projet est donc de développer une nouvelle approche de l'étude du papier préindustriel, qui prenne en compte aussi bien les caractéristiques visuelles facilement identifiables (filigranes, chaînettes, vergeures...) que les caractéristiques physiques et structurelles (épaisseur, texture de surface, type de fibres et procédé mécanique de traitement des fibres...). En cela, elle entend favoriser une description holistique du matériau-papier. Cette méthodologie s'accompagnera en outre de la définition de critères de comparaison entre des feuilles, qui permettront notamment de proposer une datation relative des échantillons étudiés, ou encore de distinguer dans une feuille les traces inhérentes à la forme et celles qui résultent du geste du papetier. Destinée à être mise en œuvre aussi bien par des conservateurs-restaurateurs que par des chercheurs étudiant des objets sur support papier, cette méthodologie a également pour ambition de former le regard à la détection d'indices contenus dans le papier même, que seule une « lecture de feuille » attentive permet de révéler.

3 Avec le regard critique et les mises à jour nécessaires ; voir à ce sujet Neil Harris et Ilaria Pastrolin, *Briquet reloaded*, Lyon, 2018. Publication en ligne : <https://docplayer.fr/110944227-Neil-harris-ilaria-pastrolin-briquet-reloaded.html>

4 Une méthode de mesure systématique de l'espacement des chaînettes et vergeures sur les papiers non filigranés, appliquée en l'occurrence à l'étude des manuscrits, est décrite dans David L. Vander Meulen, "The Identification of Paper without Watermarks : The Example of Pope's 'Dunciad'", *Studies in Bibliography*, vol. 37, 1984, p. 58-81. *JSTOR*, www.jstor.org/stable/40371793. Consulté le 28 janvier 2020.

Méthodologie de recherche

Le projet que nous présentons ici est porté par une équipe pluridisciplinaire au Rijksmuseum d'Amsterdam⁵. Lancée en 2019, la première phase consiste en une campagne d'imagerie systématique de tous les papiers des dessins et estampes du Rijksprentenkabinet par radiographie Grenz⁶. La seconde phase, qui devrait débuter en 2020, vise à ajouter un module d'imagerie en lumière visible — principalement par photographie en lumière directe, rasante et transmise — à l'imagerie radiographique. Chaque feuille sera photographiée dans son intégralité afin de relever toutes les marques laissées par la forme. En effet, ces dernières constituent une série d'indices précieux sur le format originel de la feuille si celle-ci a été recoupée. De plus, elles permettent, en creux, une lecture précise de la morphologie du tamis, qu'un œil exercé peut traduire en termes de provenance et de datation. Cette entreprise ne se limite donc pas seulement au relevé des filigranes, qui en constitue certes un aspect important, mais à la connaissance approfondie de la matérialité de chaque feuille de papier, dans sa structure même. L'exploitation des données collectées se fera au fur et à mesure de l'avancée de l'imagerie. Les images de filigranes acquises sont destinées à alimenter une base de données accessible aux chercheurs (notamment à partir du portail Bernstein – The Memory of Paper⁷ et du portail public des collections du Rijksmuseum⁸). En outre, grâce aux dernières avancées en matière d'intelligence artificielle, ce volume de données servira à développer des outils numériques innovants pour faciliter l'étude des papiers anciens par l'image. À terme, le projet a pour but d'établir une méthode de description, d'étude et d'imagerie du papier préindustriel. Elle s'appuiera sur une « boîte à outils » en ligne composée d'applications co-développées par des conservateurs-restaurateurs, conservateurs et scientifiques, grâce auxquelles l'utilisateur pourra étudier différents aspects de la matérialité d'un papier après avoir téléchargé ses propres images.

5 L'équipe est constituée de Leila Sauvage, conservatrice-restauratrice d'arts graphiques ; Pr. Dr. Robert G. Erdmann, Senior Scientist ; Erik Hinterding, Conservateur des estampes ; Ilona van Tuinen, Conservateur des dessins hollandais ; Idelette van Leeuwen, responsable de l'atelier de restauration des arts graphiques ; Dionysia Christoforou, conservatrice-restauratrice d'arts graphiques ; Marie-Noëlle Grison, historienne de l'art ; Henryk van Hugten, technicien d'imagerie radiographique ; Dr. Bas van Velzen (conseiller-expert), responsable de la formation des restaurateurs en arts graphiques de l'Universiteit van Amsterdam et Jacques Bréjoux (conseiller-expert), papetier.

6 Voir ci-après, chapitre 1/L'imagerie au service de l'étude des papiers.

7 http://www.memoryofpaper.eu:8080/BernsteinPortal/appl_start.disp. Consulté le 16 avril 2020.

8 <https://www.rijksmuseum.nl/en/search>. Consulté le 16 avril 2020.

Notre méthodologie se fonde en outre sur la conviction que toute l'imagerie et la technologie disponibles ne seraient d'aucune utilité sans une compréhension parfaite, par les concepteurs et les utilisateurs de cette boîte à outils, du geste papetier et des techniques de papeterie préindustrielle. C'est la condition *sine qua non* pour interpréter correctement les résultats, mais aussi pour choisir le mode d'imagerie le plus adapté pour répondre à ses questions de recherche. Dans cette optique, le dialogue avec des papetiers, voire l'expérimentation directe, sont indispensables pour garantir le développement d'outils pertinents qui recèlent également une dimension pédagogique pour l'utilisateur. De même, l'intelligence artificielle, si elle peut rendre des services considérables aux chercheurs, ne saurait se passer de l'intelligence humaine — en l'occurrence du regard critique de l'utilisateur — qui reste seul juge des résultats que lui soumet la machine. Ainsi, ces outils, aussi avancés soient-ils, demeurent des aides à la décision.

Dans une première partie, nous détaillerons l'applicabilité et les informations apportées par les différentes techniques d'imagerie disponibles. Nous aborderons ensuite les nouvelles possibilités offertes par la vision par ordinateur (*computer vision*) et l'intelligence artificielle (en particulier l'apprentissage automatique ou *machine learning*) pour approfondir et faciliter l'étude de très vastes corpus de papiers.

1/ L'imagerie au service de l'étude des papiers

Observer un papier par transparence en le tenant devant une source lumineuse est le geste par excellence du filigranologiste, et de tous ceux qui s'intéressent à l'histoire du papier, puisque, selon la formule de Briquet,

*Toute feuille de papier filigrané porte en elle-même son acte de naissance, [elle] a reçu en effet l'empreinte de la forme sur laquelle elle a été faite*⁹.

Le relevé du filigrane et/ou des chaînettes s'effectuant traditionnellement en lumière transmise par tracé sur papier calque, ou encore par frottis direct sur le papier – du moins avant que la photographie ne s'impose comme la technique la plus sûre et la plus simple à mettre en œuvre pour obtenir un relevé. Toutefois, cette technique connaît ses limites lorsque le papier étudié est doublé, ou collé en plein sur un montage, ou qu'il porte des techniques graphiques très couvrantes qui font obstacle à la lumière ; c'est notamment le cas du pastel.

⁹ Charles-Moïse Briquet, « De la valeur des filigranes de papier comme moyen de déterminer l'âge et la provenance de documents non datés », *Bulletin de la Société d'Histoire et Archéologie de Genève*, tome I, livre 2, 1892, p. 4.

À partir des années 1980, la bêta-radiographie, puis la radiographie X à basse tension (Grenz) ont donc été appliquées en complément à la photographie pour remédier à ce problème, avant que d'autres techniques d'imagerie ne fassent leur apparition. Aujourd'hui, toutes les techniques avancées — radiographie, thermographie – produisent des images numériques, ce qui permet leur traitement et manipulation assistés par ordinateur¹⁰ et facilite leur stockage.

Lors du lancement du projet d'imagerie des filigranes, le Rijksmuseum a réalisé une série de tests pour comparer l'applicabilité des différentes techniques au regard de la variété des tracés graphiques représentés dans la collection. Le but de cette démarche était de déterminer quelle technique serait applicable au plus grand nombre d'objets ; certaines catégories d'œuvres requérant une technique d'imagerie différente seraient traitées séparément. Le tableau¹¹ ci-dessous dresse la liste des techniques testées à cette occasion.

	Modalités d'application	Contraintes	Avantages	Inconvénients
Lumière directe ou rasante	Tous les papiers et tracés graphiques	Aucune	- Ne requiert aucun matériel sophistiqué (lampe portative à LED), - Révèle la texture de surface et la couleur du papier	- Peu d'informations sur la structure, - Le tracé reste visible
Lumière transmise	- Papiers non doublés ni collés en plein, - Tracés graphiques peu couvrants	Requiert quelques manipulations de l'objet étudié (s'il est monté) et une table ou feuille lumineuse	Révèle toute la structure (filigrane, chaînettes, vergeures, épair)	- Le tracé reste visible, - Traitement de l'image parfois nécessaire
Bêta-radiographie	- Tous types de papiers, y compris doublés et collés en plein, - Couches fines de tracés organiques	Requiert du matériel d'imagerie avancé	- Révèle la structure (filigrane, chaînettes, vergeures), - Portable	- Danger pour la santé (radioactivité), - Les tracés inorganiques restent visibles, - Acquisition et traitement longs, - Onéreux, - Requiert une numérisation des clichés obtenus

	Modalités d'application	Contraintes	Avantages	Inconvénients
Radiographie X basse tension (Grenz) - 4-10 kV	- Tous types de papiers, y compris doublés et collés en plein, - Tracés au carbone uniquement	Requiert du matériel d'imagerie avancé	- Révèle la structure (filigrane, chaînettes, vergeures), - Bonne qualité d'image (moins que la radiographie par électrons secondaires) - Ne requiert pas de contact direct avec l'objet, - Nécessite peu de traitement de l'image, - Équipement à puissance basse (5-16W)	- Temps d'acquisition de plusieurs minutes/objet, - Émission de rayons X (cabinet protecteur, pas de salle blindée)
Radiographie par électrons secondaires¹²	- Tous types de papiers, même épais, - Large variété de tracés	Requiert du matériel d'imagerie avancé	- Révèle la structure (filigrane, chaînettes, vergeures), - Meilleure qualité d'image que la radiographie Grenz, - Nécessite peu de traitement de l'image	- Temps d'acquisition de plusieurs minutes/objet, - Émission de rayons X (requiert une salle de protection blindée), - Équipement à forte puissance (300-1000W), - Requiert un contact direct avec la surface de l'objet (exclut les pastels), - Plus difficile à mettre en œuvre que la radiographie Grenz
Thermographie infrarouge¹³	- Tous types de papiers, - Tous types de tracés, même les tracés au carbone et pulvérulents (pastel, fusain)	Requiert du matériel d'imagerie avancé	- Technique très rapide et sans contact avec la surface de l'objet - Révèle la structure (filigrane, chaînettes, vergeures), - Contraste élevé	- Applicable sur de petites zones seulement, - Nécessite un traitement de l'image, - Émission de rayonnement infrarouge

12 Pour une description du procédé, voir Marko Rakvin et al., *op. cit.*, p. 3-4.

13 Pour une description du procédé, voir Fulvio Mercuri et al., "Active infrared thermography applied to the investigation of art and historic artefacts", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, n° 104, 2011, p. 475. Publication en ligne : https://www.researchgate.net/profile/Fulvio_Mercuri/publication/226092761_Active_infrared_thermography_applied_to_the_investigation_of_art_and_historic_artefacts/links/5568261f08aecd777379996.pdf.

La visualisation de la structure interne du papier cachée par le tracé a donc motivé l'introduction d'autres méthodes d'imagerie que la photographie en lumière visible. Les techniques radiographiques (Grenz et radiographie par électrons secondaires) utilisent la propriété des rayons X de traverser la matière plus ou moins profondément, selon sa nature, sa densité et son épaisseur. Il s'agit d'une forme de radiation électromagnétique, produite par interaction à grande vitesse entre la matière et des électrons générés par un tube. Les rayons X sont caractérisés par leur énergie (E , exprimée en keV) et/ou leur longueur d'onde (λ , exprimée en nm). En règle générale, les rayons X à haute énergie (ou "durs") ont des longueurs d'ondes plus courtes que les rayons X à basse énergie (ou "mous"). Pour obtenir des rayons X à haute énergie, le tube-source doit être soumis à un kilovoltage (kV) maximum¹⁴.

Radiographie numérique à basse tension (*computed Grenz radiography*)

Les rayons X dits "durs" ont un pouvoir de pénétration trop important et traversent le papier sans produire d'image. Les rayons de Grenz, parfois appelés "rayons X mous", sont moins énergétiques et sont donc utilisés pour les matériaux à faible densité, comme le papier. À basse énergie, entre 4 et 10 kV, la radiographie Grenz permet de produire une image traduisant la différence de densité et d'épaisseur du papier, et révélant ainsi sa structure interne : filigrane, chaînettes, vergeures, épair.

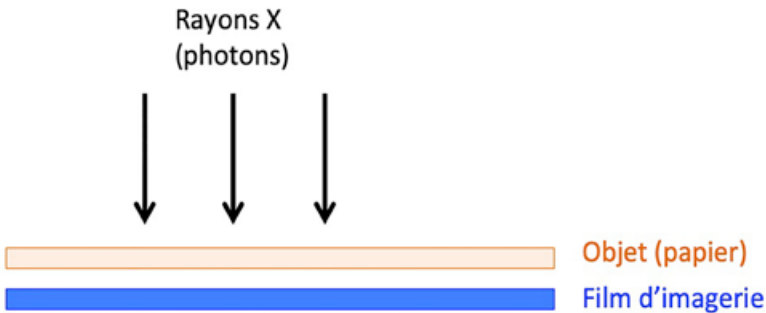


Fig. 1. Principe de la radiographie X basse tension. © Leila Sauvage, Rijksmuseum



Fig. 2. Le cabinet de radiographie Grenz du Rijksmuseum (Balteau NDT Baltomatic AIS838). Cette unité peut accueillir des objets jusqu'au format raisin (60 × 80 cm). © Rijksmuseum.

Cette technique est employée au Rijksmuseum depuis les années 1990, période à laquelle une partie des estampes de Rembrandt van Rijn (1606–1669) ont été radiographiées¹⁵. Vingt-six ans plus tard, en préparation de l'exposition dédiée au graveur et peintre Hercules Segers (1589-1638), les estampes de la collection ont été radiographiées afin d'imager la structure du papier qui restait invisible en raison d'une couche de préparation épaisse¹⁶. En 2019, le musée s'est doté d'une nouvelle source de rayons X à basse tension (5-15 kV et 15-40 kV) couplée à un équipement de radiologie numérique (*computed radiography* ou CR) pour l'étude des papiers de la collection d'estampes et de dessins¹⁷. La source de rayons X étant entourée d'une structure en acier recouverte de plomb, le système

a pu être installé dans une chambre noire de l'atelier de conservation-restauration. L'opérateur place l'objet sur un film d'imagerie contenant du phosphore (aucune pression n'est appliquée) et l'installe dans l'enceinte où le tube est monté sur un système capable de déplacer la source de droite à gauche et d'avant en arrière. Une fois la porte verrouillée, la radiographie peut être commandée à distance depuis un ordinateur.

L'intérêt de la radiologie numérique (CR) réside dans le fait que les films au phosphore sont réutilisables¹⁸ et numérisables : ils sont flexibles et composés de cristaux inorganiques appliqués sur un film de polyester. Contrairement aux films analogues, la durée d'exposition est raccourcie et aucun traitement

15 Theo Laurentius *et al.*, "Het Amsterdamse onderzoek naar Rembrandt papier : radiografie van de watermerken in de etsen van Rembrandt", *Bulletin van het Rijksmuseum*, n° 40, vol. 4, 1992, p. 353-384. Publication en ligne (page consultée le 6 avril 2020) : <https://www.jstor.org/stable/40382840?seq=1>

16 Huigen Leeftang et Pieter Roelofs (dir.), *Hercules Segers: painter, etcher*, Amsterdam, Rijksmuseum, NAI Publishers, 2016-2017.

17 Baltomatic AIS838, par Balteau NDT. <https://www.balteau-ndt.com/baltomatic/?serie=ais-series>

chimique du film n'est nécessaire. Lorsqu'il est exposé aux rayons X, l'énergie venant de la radiation est capturée par la couche de phosphore du film. Le film est ensuite numérisé¹⁹. Au cours de la numérisation, le scanner stimule le film avec un rayon laser. Le film émet une lumière bleue dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de radiation qu'il a reçue pendant l'exposition aux rayons X. Cette lumière est détectée par un tube multiplicateur (*photomultiplier tube*, PMT) — un appareil analogue très sensible — puis convertie en signal numérique en utilisant un convertisseur analogue-vers-numérique (*analog-to-digital converter*, ADC). L'image radiographique numérique peut ensuite être vue et manipulée avec le logiciel D-tect X-ray inspection. Le film, quant à lui est effacé avec une source de lumière intense pour réemploi immédiat.

Les expériences menées par Annelies van Hoesel ont abouti aux deux observations suivantes : il est important de garder le kilovoltage aussi bas que possible pour obtenir un meilleur contraste ; la distance entre l'objet et la source de rayons X doit être réduite au maximum pour minimiser la déperdition de rayons X ; pour les objets plus grands, la source doit être éloignée pour capturer l'intégralité de la feuille, donc le courant (mA) et le temps d'exposition doivent être augmentés pour compenser le bruit.

À l'heure actuelle, les paramètres suivants sont appliqués pour radiographier des objets de petit format : 7 kV (8 kV pour les papiers plus épais), 4,2 mA, 3 minutes d'exposition et 45 cm de distance entre l'objet et la source.

Radiographie par électrons secondaires (*electron transmission radiography*)

Le musée possède également une unité de radiographie par électrons secondaires dans une salle blindée. Cette technique repose sur la production d'électrons par l'impact de rayons X de haute énergie (150 à 250 kV et 420 kV²⁰) sur une feuille de métal lourd, comme le plomb²¹.



Fig. 3. Salle de radiographie du Rijksmuseum, pour les équipements générant des rayons X de haute énergie (jusqu'à 225 kV). Sur cette image, équipement Baltograph, par Balteau NDT (15-225 kV), utilisé pour les matériaux lourds. © Rijksmuseum.

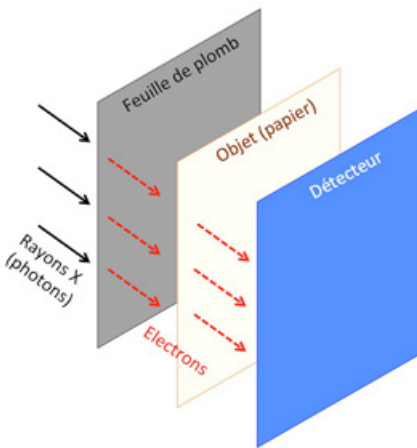


Fig. 4. Principe de la radiographie par électrons secondaires. © Leila Sauvage, Rijksmuseum

Pour ce type de radiographie, l'objet est placé entre une feuille de plomb et le détecteur pendant plusieurs minutes. Les rayons X de haute énergie induisent un effet photoélectrique sur la feuille de plomb qui se met à émettre des photoélectrons transmis à l'objet papier. Ce dernier absorbe ou transmet au détecteur les électrons en fonction de sa densité et épaisseur. Avec ce système, la source est diffuse et les électrons sont encore diffusés par le papier. L'objet doit donc être en contact direct avec la feuille de métal et le détecteur afin d'obtenir une image la plus nette possible. En raison de l'énergie des rayons X employés, cette radiographie doit être mise en œuvre dans une salle blindée et l'opérateur doit lancer l'acquisition depuis l'extérieur.

Les expériences menées au Rijksmuseum et au BAM ont montré que cette technique est applicable à tout type de médium qui peut supporter le contact intime avec un autre matériau (les tracés pulvérulents ne peuvent donc pas être imagés de cette façon) et à des feuilles de papier épaisses (jusqu'à 200-250 micromètres avec une source à 420 kV) ;

Elles ont également montré que la résolution des images obtenues peut être meilleure que celles obtenues par radiographie X basse tension : la structure du papier est clairement visible pour les deux sources (250 et

420 kV), mais les images obtenues avec une source de 420 kV comportent moins de bruit et sont plus contrastées que celles obtenues à 250 kV²².

Néanmoins, la mise en œuvre de cette technique est plus complexe car elle implique la manipulation d'une source de rayons X plus énergétique par un personnel habilité et des temps d'exposition plus longs.

Thermographie infrarouge ou photographie thermique infrarouge

La thermographie infrarouge permet de mesurer sans contact la différence de température entre un objet et une référence. Le système décrit ici est le fruit d'une collaboration entre l'Institut Fraunhofer pour la recherche sur le bois (Wilhelm-Klauditz Institut, WKI) et l'Institut de Technologies de l'information et de la communication (IfN) de l'Université Technique de Braunschweig²³. Cette méthode est basée sur la capacité du papier à absorber ou diffuser la radiation infrarouge transmise en fonction des variations de sa densité (filigrane, vergeures) et donc d'imager sa structure, à travers tout type de tracé, y compris les tracés à base de carbone.

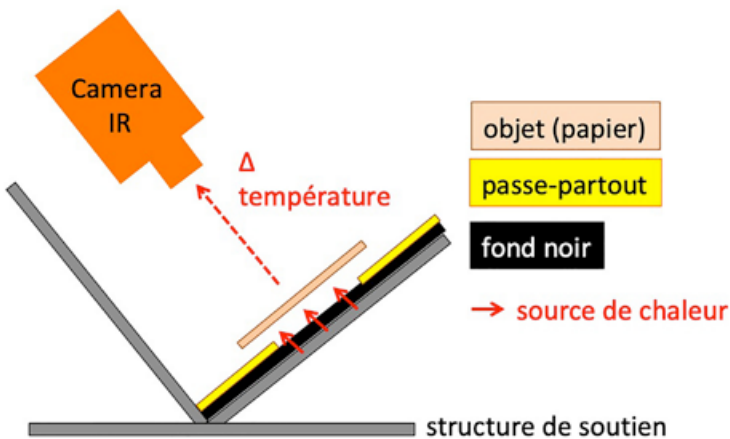


Fig. 5. Schéma de l'installation expérimentale de thermographie infrarouge. © Leila Sauvage, Rijksmuseum

L'objet est placé pendant quelques secondes sur une fenêtre de passe-partout, devant une plaque chauffante. Une caméra sensible aux infrarouges (moyens et lointains) est placée à 40-50 cm de l'objet afin d'enregistrer les

22 Pour des papiers fins, les paramètres suivants ont été testés : 225 kV, 18 mA, 15 minutes d'exposition (Rijksmuseum) et 420 kV, 10 mA, 15 minutes d'exposition (BAM).

variations de température ($< 0,02$ °C). Lorsque la plaque est chauffée à 40 °C, la radiation infrarouge est transmise au verso du papier. Cette radiation, absorbée différemment par le papier, selon sa densité et son épaisseur, est finalement capturée par la caméra.

Pour cette technique, les images sont extraites d'un film enregistré par la caméra pendant l'expérience. Les changements de température étant de très faible amplitude, la structure du papier n'est parfois perceptible que pendant quelques secondes, qui doivent être enregistrées par la caméra. À l'heure actuelle, les caméras haute résolution disponibles ne peuvent capturer la totalité de l'objet, mais une partie de l'objet (15 × 15 cm, correspondant au filigrane le plus souvent)²⁴.

Cette méthode, sans contact, est adaptée à tout type d'objet, y compris les œuvres au tracé pulvérulent et les ouvrages reliés. L'acquisition des données est assez rapide, mais elle requiert un travail de sélection et de traitement d'image important. Le développement de nouvelles caméras infrarouges à haute résolution permettra peut-être dans le futur de capturer des zones plus grandes que 15 × 15 cm²⁵.

La figure 6 présente un exemple d'images obtenues à partir d'un même échantillon sur papier, avec les techniques décrites ci-dessus.

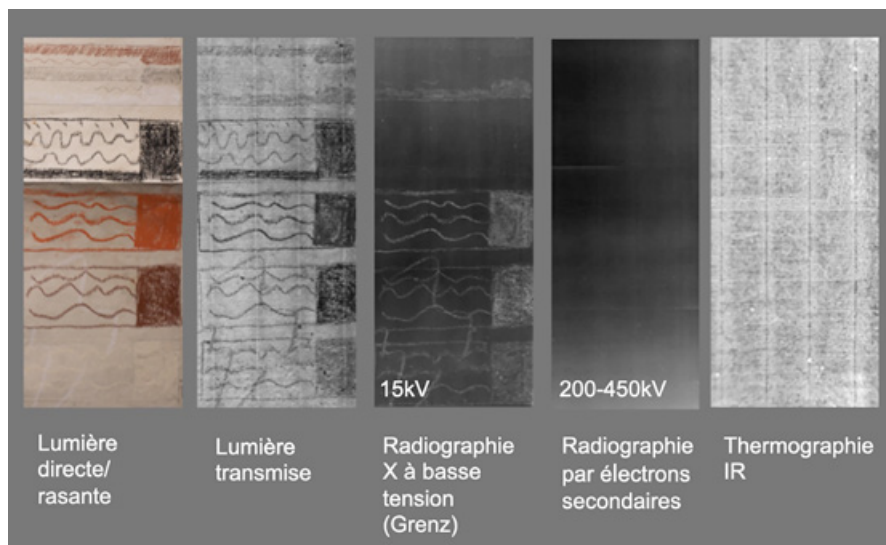


Fig. 6. Essai comparé de différentes techniques d'imagerie sur le même échantillon de papier portant divers média graphiques ; de haut en bas : « trois crayons », fusain, trois teintes de pastel (Annelies van Hoesel, *op. cit.*). (Radiographie Grenz réalisée par Annelies van Hoesel, Rijksmuseum; radiographie par électrons secondaires réalisée par Uwe Zscherpel, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin; thermographie IR réalisée par Hagen Immel et Peter Meinschmidt, Staatsbibliothek zu Berlin.) © Rijksmuseum

A/ Photographie en lumière rasante. L'image obtenue en lumière rasante révèle quelques détails de la structure interne du papier (filigrane, chaînettes, vergeures), mais le tracé reste encore très visible et couvre une grande partie du papier.

B/ Photographie en lumière transmise. En lumière transmise, la structure interne du papier est bien plus visible mais encore partiellement recouverte par le tracé. Une manipulation informatique visant à combiner les images obtenues en lumière directe, rasante et transmise peut être appliquée pour renforcer les contrastes et rendre les propriétés structurelles du papier plus visibles.

C/ Radiographie X à basse tension. La radiographie X basse tension permet d'obtenir des images contrastées, révélant davantage la structure du papier. Si le tracé est à base de carbone, il n'est plus visible, mais les tracés contenant des matériaux lourds, comme le plomb, couvrent encore partiellement le papier. En outre, plus le papier est épais, plus sa structure est difficile à imager avec cette technique.

D/ Radiographie par électrons secondaires. La radiographie par électrons secondaire permet, quant à elle, de traverser la plupart des tracés et d'obtenir

des images très contrastées et de haute résolution. Une telle technique n'est toutefois pas applicable aux tracés pulvérulents ou fragiles car elle nécessite un contact direct avec une feuille de plomb.

E/ Thermographie infrarouge. La thermographie infrarouge permet d'imager la structure du papier à travers tout tracé non carboné et certains tracés à base de plomb (selon la nature du liant). Cette technique ne permet pas encore de capturer la totalité de la plupart des feuilles.

En prenant en compte de la qualité des images obtenues et des contraintes techniques et financières évoquées précédemment, le Rijksmuseum a décidé d'utiliser la radiographie X à basse tension et la photographie en lumière directe, rasante et transmise pour la plus grande partie de la collection. La radiographie X à basse tension peut en effet être installée dans l'atelier de conservation-restauration et manipulée par le personnel de l'atelier. L'acquisition est rapide et permet d'obtenir des images contrastées et de haute résolution avec peu de post-traitement informatique. Pour les œuvres au tracé pulvérulent ou de format plus grand que raisin (60 × 80 cm), qui ne peuvent pas être imagées par ce type de radiographie, un système de thermographie infrarouge sera loué et utilisé in situ.

2/ Vision par ordinateur et intelligence artificielle au service de l'étude des papiers

À ces techniques d'imagerie viennent s'ajouter des outils novateurs de traitement de l'image et de vision par ordinateur. Étroitement liée aux champs de la robotique et de l'intelligence artificielle, la vision par ordinateur s'intéresse aux procédés selon lesquels les machines acquièrent et analysent des informations visuelles afin d'en extraire un contenu pertinent pour la tâche qui leur est assignée. Dans le cas du traitement des données relatives aux matériaux artistiques, la vision par ordinateur permet non seulement d'améliorer la lisibilité des images (contraste, netteté, etc.), mais également de visualiser d'autres caractéristiques physiques qui pourraient échapper à l'examen. De nombreuses applications se sont développées au cours des dernières décennies, notamment dans le domaine de la peinture de chevalet (analyse de la toile à partir de radiographies, etc.), et de la sculpture (modélisations 3D à partir de scans, photogrammétrie, etc.). Toutefois, en dépit des possibilités immenses offertes par les techniques de vision par ordinateur, celles-ci ne se sont pas encore imposées comme des outils de recherche et d'analyse qui pourraient compléter au quotidien l'imagerie des œuvres sur papier. Les expérimentations menées actuellement au Rijksmuseum ont donc pour ambition de développer des techniques spécialement adaptées au papier, qui puissent aider les

conservateurs-restaurateurs et les historiens d'art à résoudre leurs questions de recherches. L'ordinateur viendra donc ici en renfort de l'expert déjà capable d'analyser une feuille, en augmentant la lisibilité des images et le degré de précision pour des cas complexes, mais permettra également à des non-experts de collecter ce type d'informations sur des corpus plus larges.

Acquérir un grand nombre d'images et les traiter informatiquement ne constitue plus aujourd'hui une difficulté en soi : la plupart des (grandes) institutions culturelles sont dotées de réseaux à très haut débit, disposent de capacités de stockage quasiment illimitées, sont équipées de matériel d'imagerie et de logiciels de traitement d'image spécialisés²⁶. Le vrai défi réside plutôt dans la manière de visualiser cette quantité de données et de les rendre intelligibles pour les utilisateurs. C'est la raison d'être du *Curtain Viewer*²⁷, un outil de visualisation dynamique qui combine les technologies d'alignement d'images et une interface intuitive développée selon les principes de psychologie de la perception humaine. Il permet de superposer jusqu'à quatre images d'un même objet, acquises selon des techniques différentes, et de les révéler par simple glissement du pointeur d'une souris. Il est donc possible d'embrasser d'un seul regard toutes les manifestations de l'objet (visibles et non-visibles à l'œil nu) et de comprendre comment celles-ci s'articulent. L'imagerie multimodale des dessins et estampes du Rijksmuseum est donc un parfait exemple d'utilisation du *Curtain Viewer*. À terme, il sera mis à disposition des utilisateurs — avec d'autres applications développées au fil du projet — dans la boîte à outils numérique pour l'étude des papiers (fig. 7).

Nous souhaitons par ailleurs présenter quelques applications possibles de l'intelligence artificielle pour approfondir l'étude de vastes corpus d'images, comme celui en cours d'élaboration au Rijksmuseum. L'intelligence artificielle regroupe l'ensemble des modalités permettant aux machines d'imiter les fonctions cognitives du cerveau humain (perception, apprentissage, analyse, raisonnement, résolution de problèmes, etc.) Si les bases conceptuelles en

26 Les solutions suggérées par Meinschmidt et Märgner en 2009 pour les images en lumière rasante et transmise peuvent être largement améliorées par les outils disponibles aujourd'hui. Peter Meinschmidt et Volker Märgner, "Advantages and Disadvantages of Various Techniques for the Visualization of Watermarks", *Restaurator*, vol.30, n°3, septembre 2009, p. 222-243.

27 Inventé par Robert G. Erdmann, le *Curtain Viewer* a été mis en œuvre pour la première fois à grande échelle en 2016 sur son site <http://boschproject.org>, pour la visualisation interactive des figures du catalogue raisonné de l'œuvre de Jérôme Bosch. Il est aujourd'hui utilisé quotidiennement par les conservateurs-restaurateurs et scientifiques du Rijksmuseum.

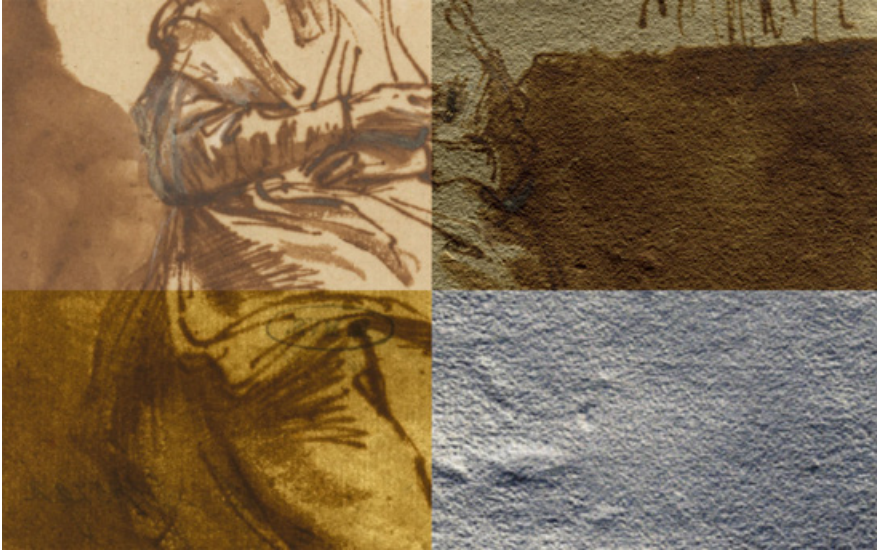


Fig. 7. Exemple d'application du *Curtain Viewer* sur un dessin de Rembrandt van Rijn, *Femme (Saskia?) assise à la fenêtre*, Rijksmuseum, inv. RP-T-1930-51. Dans le sens horaire, photographie en lumière incidente, photographie en lumière rasante, cartographie de la texture de surface inférée par ordinateur, photographie en lumière transmise. © Henni van Beek, Rijksmuseum (prise de vue); Pr. Dr. Robert G. Erdmann, Rijksmuseum-UvA (traitement des images et visualisation).

ont été posées dès 1956 par des universitaires américains²⁸, la recherche en intelligence artificielle a connu des avancées décisives à partir des années 2000. Elles sont liées à l'introduction de nouvelles technologies qui ont permis de démultiplier la puissance de calcul d'un ordinateur²⁹, ainsi qu'à la généralisation, dans le domaine de l'apprentissage automatique, des réseaux neuronaux convolutifs profonds. Apparus en 2011, ces derniers, dont l'architecture reproduit l'organisation des cellules du cortex visuel des mammifères, sont actuellement les systèmes les plus performants pour l'analyse automatisée (identification et classification) de contenus visuels³⁰. Cela implique que la machine n'a besoin

28 L'expression *artificial intelligence* a été forgée par le scientifique américain John McCarthy, l'un des co-fondateurs de la discipline.

29 Dave Steinkraus, Patrice Simard, Ian Buck, "Using GPUs for Machine Learning Algorithms", *12th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2005)*, p. 1115-1119. Publication en ligne : <https://ieeexplore.ieee.org/document/1575717>.

30 Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey E. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks", *NIPS'12: Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems*, volume 1, décembre 2012, p. 1097-1105. Publication en ligne : <http://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks.pdf>.

ni de mots-clés ni de métadonnées pour opérer un tri, une recherche ou des comparaisons au sein de très grands corpus d'images.

Le Rijksmuseum s'est illustré depuis quelques années par ses recherches innovantes menées sur les applications des réseaux neuronaux convolutifs profonds à des données de conservation-restauration et d'histoire de l'art³¹. Le présent projet d'imagerie multimodale des œuvres sur papier offre l'occasion de poursuivre ces recherches sur une nouvelle catégorie d'objets. Les axes de recherche sont multiples. L'un d'entre eux concerne la segmentation sémantique automatisée d'images (en lumière transmise ou radiographiques) de papiers³². L'ordinateur doit en effet être en mesure de discriminer avec précision différents éléments de l'image (filigranes, chaînettes et vergeures) et d'en extraire un tracé qui sera ensuite comparé pour trouver d'éventuelles correspondances. En d'autres termes, il s'agit d'apprendre à la machine à identifier quels pixels d'une image donnée appartiennent au filigrane, aux chaînettes, etc³³. L'expérimentation a été menée sur le corpus d'images en lumière transmise de filigranes issus de l'album Dawson Turner, conservé à la Princeton University Library³⁴. Les premiers résultats obtenus démontrent que l'ordinateur ne relève pas les chaînettes et vergeures mais bien le filigrane uniquement, et cela malgré la nature identique de ces marques — toutes deux correspondant à une différence d'épaisseur dans la feuille de papier. Le relevé est d'autant plus exact que le filigrane est bien lisible et que la feuille présente un épaisseur homogène. Le deuxième exemple illustre justement la difficulté de l'ordinateur à discriminer entre le tracé du filigrane et certaines irrégularités dans la structure de la feuille, causant ce bruit dans le relevé. Ces résultats prouvent d'une part que les images en lumière transmise, parfois difficilement lisibles, restent exploitables par la machine, et d'autre part que même des images de résolution moyenne³⁵ peuvent être traitées avec succès. Cela permet donc d'envisager d'inclure des images prises avec un smartphone.

31 Ellen van Bork, Robert G. Erdmann, "Training a Database and Convolutional Neural Network for Automated Recognition of Hallmarks on (Dutch) Silver", communication présentée à la conférence *ICOM-CC Metal*, Neuchâtel, 2 septembre 2019.

32 La segmentation et extraction automatisée des filigranes et chaînettes à partir d'images en lumière transmise (et la question corollaire de l'élimination digitale des techniques graphiques au recto et au verso d'un papier) est un défi qui s'est posé aux chercheurs bien avant l'apparition des réseaux neuronaux; l'une des réponses avait été apportée alors par Hazem Hiary et Kia Ng, *op. cit.*

33 Présentée à un stade très préliminaire en octobre 2019, cette technologie est toujours en cours de développement et fera l'objet d'une publication approfondie ultérieurement.

34 <https://graphicarts.princeton.edu/2019/07/02/shreadsheets-to-watermarks/>, mis en ligne le 2 juillet 2019.

35 Le présent test a été conduit sur des fichiers TIF de 5 à 6 Mo.

Il faudra ensuite appliquer également ce principe au relevé des chaînettes et

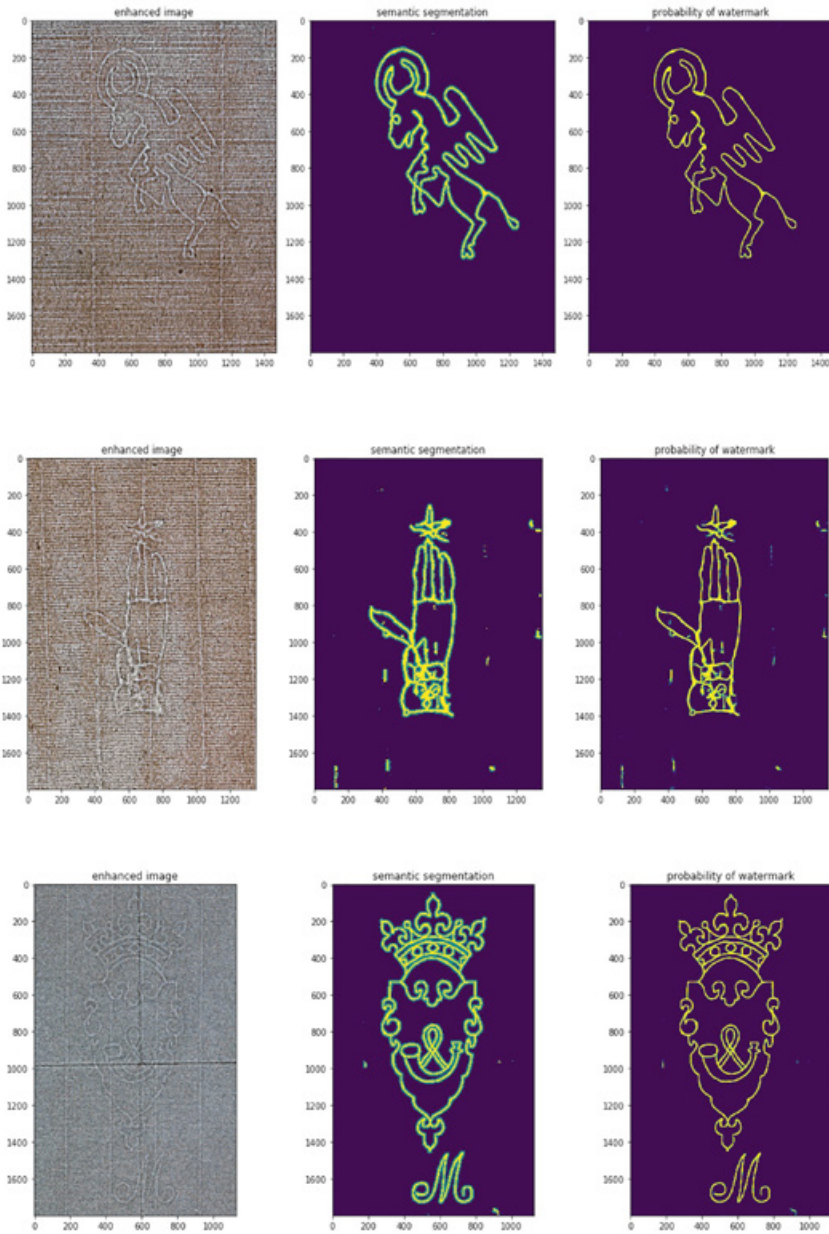


Fig. 8. A partir d'une image en lumière transmise optimisée (à gauche), le réseau neuronal effectue une segmentation sémantique (au centre) des pixels appartenant au filigrane (en jaune) et des pixels se trouvant à la bordure interne et externe du filigrane (en bleu), puis en extrait la probabilité de présence du filigrane (à droite), c'est à dire son tracé le plus plausible. © Pr. Dr. Robert G. Erdmann, Rijksmuseum-UvA.

des vergeures. Ainsi, toutes les marques laissées par la forme vont devenir interrogeables pour faciliter les comparaisons. Cela permettra, même en l'absence de filigrane d'extraire des éléments de datation et des informations techniques de tout échantillon de papier. Ici encore l'ordinateur ne se substitue pas à l'expert : il proposera un premier tracé, soumis à la validation de l'expert qui aura toute latitude pour le rectifier avant d'interroger la base. L'étape suivante consistera à connecter ce corpus aux répertoires de filigranes en ligne (Briquet³⁶, Gravell³⁷, etc.) et aux bases de données d'images de filigranes (centralisées sur le portail Bernstein - The Memory of Paper) pour permettre l'identification automatisée des filigranes.

Conclusion et perspectives

Ce projet a donc l'ambition de développer une nouvelle approche de l'étude des papiers anciens. Le corpus-test, que constitue la collection d'œuvres graphiques du Rijksmuseum, est idéalement représentatif de la majorité des grandes collections graphiques institutionnelles par sa taille et sa diversité. Les méthodes d'imagerie et la technologie informatique disponibles rendent aujourd'hui possible une exploration de la matérialité du papier dans toutes ses dimensions, aussi bien à l'échelle d'une feuille — en fournissant des outils d'analyse macro- et microscopiques, qu'à l'échelle d'une collection entière — en comparant entre elles des milliers de feuilles.

L'une des tâches de fond concernera l'établissement d'une méthodologie globale de la description des papiers : matières premières, procédé de raffinage de la pâte, types de formes, traitement de surface, etc. Cette méthodologie unira de façon organique texte et images, en s'appuyant sur les normes existantes³⁸ ainsi que sur l'expérience acquise au cours du projet. Elle devra également être applicable à tous les types de papiers préindustriels rencontrés dans une collection (arts graphiques, archives et livres anciens). Elle permettra par exemple aux conservateurs-restaurateurs d'identifier précisément un type de papier et d'adapter en conséquence leurs stratégies de conservation et traitements. Les historiens (d'art) et conservateurs y verront, quant à eux, un nouvel outil de *connoisseurship* qui les aidera dans leurs travaux de catalogage des collections.

À terme, toutes les données acquises lors du projet seront stockées dans une base de données sur laquelle s'adossera la boîte à outils numérique pour l'étude des papiers. L'accent sera mis sur l'interconnectivité, la base étant connectée à d'autres bases de données, notamment de filigranes et de formes papetières.

36 http://www.ksbm.oew.ac.at/_scripts/php/BR.php?IDtypes=10&lang=fr.

37 <https://www.gravell.org/search.php>.

Après une phase de test en interne, la base et la boîte à outils seront ouvertes à tous les utilisateurs. D'autres institutions pourront ainsi les utiliser et y indexer leurs propres données, ou soumettre une requête en chargeant leurs images, contribuant ainsi à l'accroissement du corpus de référence. La pertinence des résultats de recherche, ainsi que la possibilité de trouver des correspondances exactes, dépend en effet de la taille de ce corpus, mais également de la quantité de données historiques vérifiées qu'il contient.

Ainsi, c'est en réunissant le savoir-faire technique de la papeterie préindustrielle et les technologies informatiques les plus avancées que nous proposons de *re-matérialiser* les collections sur papier. Nous espérons que l'utilisation de ces outils permettra à la communauté scientifique de poser un regard nouveau sur ce matériau à la complexité fascinante qu'est le papier ancien.