



**HAL**  
open science

## Outils d'analyse de la dynamique des écritures médiévales pour l'aide à l'expertise paléographique

Véronique Eglin, Djamel Gaceb, Hani Daher, Stéphane Bres, Nicole Vincent

► **To cite this version:**

Véronique Eglin, Djamel Gaceb, Hani Daher, Stéphane Bres, Nicole Vincent. Outils d'analyse de la dynamique des écritures médiévales pour l'aide à l'expertise paléographique. Document numérique - Revue des sciences et technologies de l'information. Série Document numérique, 2011, 14 (1), pp.81–104. 10.3166/DN.14.1.81-104 . hal-00592003

**HAL Id: hal-00592003**

**<https://hal.science/hal-00592003>**

Submitted on 10 May 2013

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

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

---

# Outils d'analyse de la dynamique des écritures médiévales

## Pour l'aide à l'expertise paléographique

V.Eglin<sup>1</sup> D.Gaceb<sup>1</sup> D. Hani<sup>1</sup> S. Bres<sup>1</sup> N.Vincent<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LIRIS (Laboratoire d'Informatique en Image et Systèmes d'information) UMR 5205 CNRS – INNSA de Lyon – 69621 Villeurbanne Cedex.

<sup>2</sup>CRIP5 (Centre de Recherche en Informatique Paris 5) Université René Descartes – Systèmes Intelligents de Perception – 75270 Paris Cedex.

{veronique.eglin, djamel.gaceb1, hani.daher, stephane.bres}@insa-lyon.fr  
Nicole.Vincent@math-info.univ-paris5.fr

---

*RÉSUMÉ. Ce papier retrace les progrès de nos recherches en collaboration avec l'équipe de paléographe de l'Institut de Recherche en Histoire des Textes de Paris dans le cadre du projet ANR Graphem. Il s'agit d'un projet pluridisciplinaire visant à l'analyse informatisée des écritures médiévales. Notre objectif principal en tant qu'informaticiens est de développer des traitements informatiques pour assister les experts en paléographie dans le délicat travail d'étude et de déchiffrement des écritures anciennes. Nous présentons dans ce papier nos nouvelles méthodes d'analyse de contenu, de décomposition de l'écriture manuscrite en graphèmes, de construction d'une table de codage livrant la présence et la fréquence d'apparition des graphèmes de l'écriture. Les diverses techniques développées sont inspirées de méthodes empruntées à l'imagerie au sens large (dont l'imagerie médicale) et de modèles mathématiques avec la théorie des graphes (coloration de graphes) et l'optimisation combinatoire. La sélection d'approches très spécifiques à ces divers domaines s'est montrée particulièrement intéressante dans notre cas d'étude, en apportant d'une part une caractérisation fine et rapide basée sur le suivi de mouvement de la plume (courbure, épaisseur, direction, etc.) et d'autre part une méthodologie d'analyse très performante pour la catégorisation des formes de base: les graphèmes. Les outils que nous avons produits ont pour ambition de permettre aux paléographes d'étudier rapidement et avec plus de précision un grand volume de manuscrits et d'extraire un nombre important de caractères spécifiques d'un individu ou d'une époque. Nous indiquerons à ce titre en quoi les retours des paléographes sur nos résultats sont indispensables pour évaluer nos algorithmes et produire les paramétrages les plus adéquats.*

*ABSTRACT. This paper recounts the progress of our research in collaboration with SHS in the Graphem ANR project. This multidisciplinary project aims to the computerized analysis of medieval manuscripts. Our main objective as computer scientists is to develop computer processing methods to help experts in paleography in the delicate task of study and*

*deciphering of ancient manuscripts. We present in this paper our new methods of content analysis, decomposition of the handwriting in graphemes and the construction of a code book. The various developed techniques are inspired by methods from imaging in a board sense (including medical imaging) with graph theory (graph coloring) and combinatorial optimization. The selection of very specific approaches from these areas has been particularly interesting in our case study, providing firstly a rapid and detailed characterization based on tracking the pen movement (curvature, thickness, direction, etc..) and secondly a high-performance methodical analysis for the categorization of basic shapes: the graphemes. The tools that we have produced enable the paleographers to study quickly and more accurately a large number of manuscripts and to extract an important number of features that are specific to an individual or era. We will indicate in this context how important the feedback from paleographers are to evaluate our algorithms and produce the most appropriate settings.*

*MOTS-CLÉS : paléographie, coloration de graphes, analyse d'image, segmentation des textes manuscrits, extraction de caractéristiques, clustering.*

*KEYWORDS: Paleography, graph coloring, automatic analysis of manuscripts, text segmentation, features extraction, clustering.*

---

## 1. Introduction

Cet article s'inscrit dans le cadre du projet ANR GRAPHEM. Il représente une contribution méthodologique applicable à l'analyse automatique des écritures manuscrites anciennes pour assister les experts en paléographie dans le délicat travail d'étude et de déchiffrement de ces écritures. Nous nous sommes intéressés en particulier aux anciens manuscrits latins du Moyen Âge qui précèdent la période de la Renaissance, avant l'émergence de l'imprimerie.



**Figure 1.** Exemples de manuscrits anciens latins du Moyen Âge, IRHT<sup>1</sup>.

La production de l'écrit au Moyen Âge présente la particularité d'avoir des procédures raisonnées de fabrication et de contrôle de qualité nécessitant de chercher les indices les plus subtils présents dans les manuscrits, et de faire « parler » des signes souvent visuels présents dans les formes et les mots. En ce sens, il faut bien comprendre la production de l'écrit du Moyen Âge comme un art à la fois visuel et manuel basé sur la réplique d'un ensemble de signes, de formes et d'images. L'enquête paléographique et philologique révèle, à travers l'histoire de la production écrite, que les textes du Moyen Âge sont autant de formes ou de signes que de contenus relatant la culture ancienne. L'étude de l'évolution de l'écriture a conduit les paléographes à s'intéresser de près aux spécialisations des ateliers de copies et à comprendre les circuits des influences graphologiques qui sont aussi celles des idées et des savoirs.

Le projet GRAPHEM<sup>2</sup> s'inscrit dans ce contexte d'études savantes de l'évolution des écritures et va chercher à mettre au point des méthodes et des techniques qui

<sup>1</sup> IRHT : Institut de recherche et d'histoire des textes

<sup>2</sup> GRAPHEM : Projet ANR Masses de données et Connaissances, <http://liris.cnrs.fr/graphem/>

permettront d'aider les experts paléographes à retrouver et comprendre les origines souvent énigmatiques des manuscrits anciens. Dans ce travail, nous ne nous intéressons pas spécifiquement au sens dégagé des textes, mais à l'analyse des traits d'écriture qui sont perçus ici comme autant de marques permettant d'en définir la provenance, d'aider les experts à resituer le texte dans son contexte historique ou géographique et à en exploiter le contenu. L'analyse du texte et l'exploitation de son contenu portent ainsi sur l'analyse de l'écriture et de ses particularités morphologiques. La notion de graphème est donc centrale dans cet article. Elle est à mettre ici en relation directe avec l'idée d'une décomposition de l'écriture en petits fragments ou petites unités qui constituent l'écriture dans son ensemble et participent à l'impression générale qui s'en dégage.

Sur le million environ de manuscrits médiévaux conservés dans le monde, très peu sont à ce jour décrits avec la précision souhaitable, moins de 10 % dans les bibliothèques majeures. Un immense travail reste donc à réaliser pour éditer les textes en étudiant notamment les nombreuses sources inédites, de manière à mettre leur contenu à la disposition de la communauté scientifique. Une très grande partie de ces documents dédiés au Moyen Âge sont détenus et numérisés par l'Institut de Recherche et d'Histoire des Textes (IRHT), partenaire de ce projet. Plusieurs centaines de milliers de manuscrits médiévaux numérisés en mode image attendent d'être analysés pour pouvoir être accessibles sur Internet et mis à disposition des chercheurs du monde entier. Contrairement aux documents imprimés numérisés dont les contenus textuels peuvent être automatiquement reconnus par OCR (Optical Character Recognition), les documents médiévaux totalement manuscrits ou peints sont actuellement hors de portée des processus de traitements automatisés. Cette description des contenus des images est nécessaire pour le fonctionnement des moteurs de recherche sur Internet (Google, yahoo, Quaero...) et des bibliothèques numériques (Bibliothèque Nationale de France « Gallica », Bibliothèque Numérique Européenne « BNUE », Europea). Cependant, il existe un trop petit nombre d'experts face à une trop grande quantité de documents à analyser pour que le minutieux travail de description puisse être réalisé dans des délais raisonnables. Les outils informatiques sont alors nécessaires non seulement pour assister les historiens dans leur travail de recherche mais aussi pour augmenter l'efficacité et la précision de leurs méthodes de travail. Le développement de traitements informatisés destinés aux experts pour les assister dans leur travail de description des contenus ne peut se faire que sur la base d'une collaboration étroite entre les chercheurs en Sciences Humaines et Sociales (SHS) et les chercheurs en informatique (STIC).

Sur ce type de manuscrits, des particularités spécifiques aux documents anciens doivent être prises en compte, comme le vieillissement des supports et des encres, l'imprégnation irrégulière des encres, les plissements, déchirements, cassures et autres dégradations du papier. De plus, les règles d'exécution des écritures en paléographie sont très strictes : certaines lettres et combinaisons de lettres ne peuvent être produites que selon une unique dynamique d'exécution. Celle-ci est parfaitement maîtrisée par les paléographes qui connaissent très précisément les

contraintes de formation des lettres et de construction des ductus. Il est donc nécessaire de tenir compte dans notre étude de toutes ces contraintes et ces particularités d'exécution des écritures. Les objectifs de cette étude sont multiples et interviennent à plusieurs niveaux d'analyse. Les principaux obstacles qu'il faut lever dans ce travail sont liés au manque crucial d'outils informatiques pour l'assistance du travail de description et l'analyse experte dans les disciplines des Sciences Humaines. Il s'agit donc pour nous de développer des traitements informatiques pour assister les experts SHS dans leur étude de ces manuscrits.

Concrètement il s'agit pour nous :

- de produire une décomposition de l'écriture en graphèmes cohérents, en évitant notamment de produire des graphèmes qui correspondraient à certains gestes de rebroussement (retour en arrière du mouvement de la plume), qui sont considérés comme des mouvements incompatibles avec la nature des plumes (le plus souvent des calames) et des supports (nature du papier) à ces époques.

- de produire une classification de l'ensemble des graphèmes produisant une table de codage (*code book* en anglais) des formes, considérée comme un dictionnaire des graphèmes triés par similarité. Cette classification est destinée à un usage paléographique : elle intègre la possibilité pour les experts en Sciences Humaines de modifier avec beaucoup de facilité les résultats de la classification par la saisie d'une seule valeur de seuil.

Il s'agit seulement pour les chercheurs en Sciences Humaines de remettre en cause leurs méthodes de travail et de rendre les expertises plus objectives qu'elles ne le sont actuellement. La collaboration avec les chercheurs en Informatique a notamment nécessité pour les chercheurs en SHS de décrire leurs méthodes actuelles de travail. Elle leur a permis de disposer de nouvelles méthodes plus adaptées aux traitements informatisés. Grâce à l'assistance de l'informatique, le passage d'une étude ponctuelle sur quelques ouvrages à une recherche sur une plus grande échelle va permettre aux chercheurs en SHS de réaliser de nouvelles découvertes.

Dans ce travail, nous démontrons la faisabilité d'un tel objectif sur une étude portant sur des échantillons d'écritures sélectionnés pour leurs particularités morphologiques et leurs différences visuelles.

Nous montrerons comment l'approche de l'analyse des écritures par décomposition en graphèmes est une étape indispensable à la reconnaissance des styles d'écriture des manuscrits. Afin d'argumenter la validité de nos contributions, Nous présenterons dans les sections suivantes les insuffisances des méthodes conventionnelles ainsi que les principes et modèles scientifiques qui soutiennent ces travaux. Nous détaillerons notamment le principe de la décomposition en graphèmes basée sur la détection de l'axe médian directement réalisée sur l'image en niveaux de gris puis la classification des graphèmes basée sur la coloration de graphes.

## 2. Décomposition des manuscrits en graphèmes

Les tentatives informatiques portant sur l'analyse des écritures du Moyen-Âge sont encore très rares. On peut à ce titre citer le système SPI «System for Paleographic Inspections» (Aiolli *et al.*, 1999) qui constitue à ce jour la seule tentative de réalisation d'un système d'assistance automatique en paléographie. On peut reprocher à ce système d'être impraticable sur des grandes bases d'images médiévales en Europe puisqu'il ne permet d'identifier deux écritures de la même famille paléographique si elles présentent de faibles variations dans le tracé des caractères et la qualité dans l'exécution de l'écriture. Il faut donc proposer de nouvelles approches moins sensibles à ces variations et capables de mesurer les formes d'écritures indépendamment du contenu des textes, de la qualité de l'exécution de l'écriture et du style personnel du scribe.

En dehors des seuls travaux reconnus et publiés sur la discrimination des écritures médiévales, nous pouvons citer les plus nombreux travaux sur la caractérisation des écritures pour des applications différentes de celle de la paléographie. Toutes ces études sont naturellement liées à notre problématique mais ne sont pas toutes directement ré-exploitable pour l'étude paléographique puisqu'elles agissent sur des écritures contemporaines aux nôtres.

Les techniques vers lesquelles nous nous sommes tournées relèvent d'une approche structurelle portant sur les invariants et les singularités des écritures. Au sein de cette famille, on peut citer les travaux fondateurs de (Kuckuck, 1980) et de (Said *et al.*, 1998) qui considèrent les propriétés visuelles et globales des textes comme autant d'indices sur lesquels repose l'analyse. D'autres travaux portant sur la définition de caractéristiques locales des styles d'écritures basées sur des calculs de gradients, de concavité et d'orientations ont été proposés par (Tomai *et al.*, 2004). (Bulacu et Schomaker, 2003) s'intéresseront également à la directionnalité des formes et aux probabilités de distributions des contours orientés pour réaliser des outils robustes de discrimination de scribes.

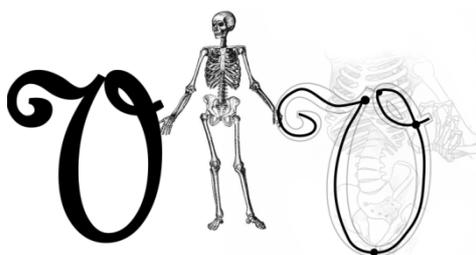
Parmi les pionniers de l'analyse des orientations pour la classification des styles d'écritures, on peut citer les travaux de (Crettez, 1995) qui utilise la rose des directions des formes binaires pour identifier les formes différentes d'écritures en vue de leur reconnaissance.

Dans ce contexte, les analyses portant à la fois sur la considération de zones d'écritures étendues et sur celle de petits fragments d'écritures ont été nos principales sources d'inspiration, car elles rendent complémentaires deux approches, locales et globales. Notre contribution s'inscrit donc dans ce schéma de principe impliquant une décomposition des formes écrites en petits fragments. Pour cela, nous exploitons une approche originale de suivi de tracé, de détection de l'axe médian et de découpage du tracé en graphèmes. Cette décomposition est résumée par la suite sous la forme d'une signature statistique globale qui exprime la

fréquence d'apparitions de ces graphèmes à partir d'un tri réalisé sur leur similarité morphologique.

### 2.1. Suivi du tracé et détection de l'axe médian

Afin de bien mesurer l'importance de la détection des informations de structure dans les images dans un domaine très particulier, la radiographie du squelette est indispensable pour réaliser certains diagnostics de l'allure du corps humain à partir d'une analyse structurelle plus simple et plus intuitive des formes. La notion de squelettisation fut introduite pour la première fois dans le domaine de la reconnaissance des formes par (Blum, 1964). La réduction d'un objet à ses éléments essentiels peut permettre l'élimination de contours dénaturés tout en gardant ses propriétés topologiques et géométriques. Les deux propriétés visées sont l'homotopie et la réversibilité. Le tracé manuscrit et son squelette ont le même nombre de composantes connexes et chacune des propriétés possède une forme comparable. Centré dans la forme de tracé, le squelette fournit une représentation équivalente au tracé et de plus unidimensionnelle. Le découpage de l'écriture en graphèmes peut se faire entièrement (et plus simplement) à travers celui du squelette qui possède la majorité de l'information synthétisée.



**Figure 2.** Squelette de la lettre V.

L'extraction du squelette sur des documents anciens dégradés devient plus exigeante dans la mesure où les bruits du bord et les irrégularités de contour sont des paramètres nuisibles. Il existe actuellement une grande variété de méthodes de suivi et de détection de l'axe médian où le choix dépend de la nature des images. Dans la littérature, ces méthodes peuvent être regroupées en six catégories selon la technique utilisée :

- L'amincissement morphologique : l'amincissement consiste à retirer au fur et à mesure les points du contour de la forme, tout en préservant ses caractéristiques topologiques. Ces méthodes nécessitent une étape préalable de binarisation des images en niveaux de gris. Celle-ci conduit à une grande perte d'informations lorsque les documents sont anciens et de mauvaise qualité (Lee et al., 1996 ; Maio et Maltoni, 1997). Elle donne ainsi des traits binaires dégradés : caractères cassés, fusionnés ou biaisés (trous, bruit). Ces dégradations déforment souvent le squelette des traits et provoquent des erreurs significatives dans leur appariement (Suh et Kim, 1997).

- Le Diagramme de Voronoï : leur squelette d'une forme continue est inclus dans le diagramme de Voronoï des points de sa frontière (Schmidt, 1989). Cette approche est définie dans un espace continu et produit un squelette connecté. L'inconvénient de ce type de méthodes revient à la difficulté de l'échantillonnage des contours qui définissent la qualité du diagramme de Voronoï et le découpage des branches à l'aide d'étapes complexes de post-traitement (Attali, 1995).

- La transformée de distance : la carte de distances d'un objet consiste à associer à chacun de ses points sa distance au point de contour le plus proche. Les maxima locaux de la carte de distance correspondent exactement aux points du squelette de l'objet. Plusieurs distances ont été utilisées dans ce cadre : Euclidienne (Danielsson, 1980 ; Choi *et al.*, 2003), Chamfer (Rosenfeld, 1968), etc. appliquées le plus souvent sur des images binaires mais aussi sur des images en niveaux de gris. Avec ces méthodes, l'extraction de l'axe médian du tracé est fortement sensible aux déformations des contours de tracé qu'on rencontre souvent sur nos images.

- Des heuristiques : ces méthodes s'appliquent directement sur les images en niveaux de gris en utilisant des heuristiques pour régler des paramètres qui gèrent la détection de l'axe médian. Elles sont très utilisées pour l'extraction du squelette des traits sur des empreintes digitales et leurs résultats sont nettement plus robustes et efficaces sur des images dégradées que ceux de deux familles de méthodes précédentes (Maio et Maltoni, 1997 ; Yaxuan, 2004). Nous pouvons également retrouver ces approches dans le domaine de l'imagerie médicale comme dans les travaux de (Sun, 1989) qui présente un algorithme géométrique de suivi du tracé sur les images de rayon-X. Cet algorithme est connu sous le nom de « Algorithme de Sun ». (Aylward et Bullitt, 2002) ont adapté ce principe aux objets tubulaires (vaisseaux sanguins) sur des images 3D en niveau de gris. L'inconvénient principal de ces méthodes c'est l'absence de l'auto adaptation aux changements d'orientation, de diamètre et aux problèmes de chevauchement et de croisement de vaisseaux sanguins ou de traits sur des images dégradées.

- La détection des contours : ces méthodes utilisent les contours pour naviguer le long du trait et détecter l'axe médian par corrélation entre une ligne et ses deux bords. Dans ce cadre, une approche itérative intéressante est proposée dans (Zhang *et Zhou*, 2007) pour détecter l'axe médian dans des images de neurones. D'autres méthodes, fondées sur le même principe, sont utilisées dans le suivi des routes sur des images satellitaires (Peteri *et al.*, 2003 ; Poz *et al.*, 2006). Ce type de méthodes ne peut pas être facilement appliqué sur des manuscrits dégradés où les contours de traits sont souvent déformés et discontinus. Dans ce cas, le suivi de contours risque de se perdre dans de petites chaînes parasites.

- De nouvelles techniques ont vu le jour notamment avec les ondelettes (You *et al.*, 2003), l'équation aux dérivées partielles (EDP) utilisant des champs de diffusion (Grigorishin *et al.*, 1998 ; Chung et Sapiro, 2000 ; Siddiqi *et al.*, 2002 ; Yu et Bajaj, 2004 ; Pervouchine *et al.*, 2005 ; Cheriet et Doré, 2006), et l'approche 3D (Baja et Nystrom, 2004). Les deux dernières approches permettent de squelettiser des images en niveaux de gris en évitant toutes les limites liées à la squelettisation des images

binaires. Ce type d'approches nécessite plusieurs itérations de lissage, mais il est plus robuste aux dégradations.

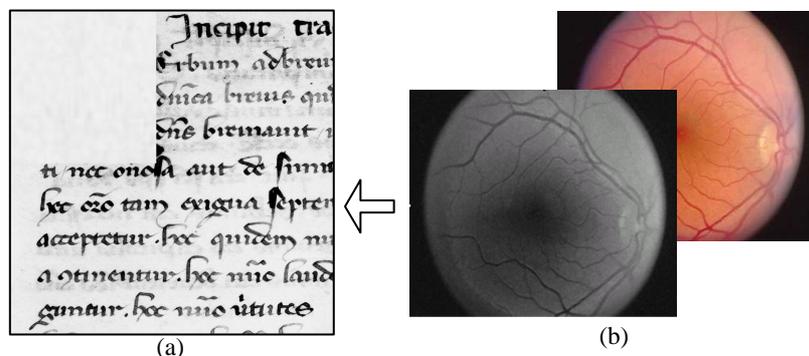
Le tableau suivant fait le bilan de ces méthodes de squelettisation selon la technique utilisée, le domaine d'application et le type d'images.

Auteur	Méthode	Domaine d'application	Type d'images
Sun <i>et al.</i> , 1998	Heuristiques	Imagerie médicale	Niveaux de gris
Aylward <i>et al.</i> , 2002	Heuristiques	Objets tubulaires	Niveaux de gris
Lorigo <i>et al.</i> , 1999	Level sets	Objets tubulaires	Niveaux de gris
Wilson et Nobel, 1999	Seuillage global	Objets non tubulaires	Binaire
Bullitt <i>et al.</i> , 2000	Heuristiques	Imagerie médicale	Niveaux de gris
Attali, 1995	Diagramme de Voronoï	Objets tubulaires arbitraires	Binaire
Grigorishin, 1998	Champs électrostatique	Reconnaissance de formes	Binaire
Ahuja et Chuang, 1997	Champs de diffusion	Reconnaissance de formes	Binaire
Chung et Sapiro, 2000	Diffusion de vecteur, anisotropique	Letters et images médicales	Niveaux de gris
Cheriet et Doré, 2006	EDP	Reconnaissance de l'écriture	Niveaux de gris
Danielsson, 1980	Transformée de distance	Reconnaissance de formes	Binaire
Rosenfeld et Pfalz, 1968	Transformée de distance	Reconnaissance de formes	Binaire
Kang et Kim, 2004	Heuristiques	Reconnaissance des chiffres	Niveaux de gris
Su <i>et al.</i> , 2009	Amincissement et graphe	Analyse des manuscrits	Binaire
Pervouchine <i>et al.</i> , 2005	B-splines	Analyse des manuscrits	Niveaux de gris
Choi <i>et al.</i> , 2003	Distance euclidienne	Reconnaissance de formes	Binaire

**Tableau 1.** Bilan sur les méthodes de suivi du tracé : aspects méthodologiques, domaine d'application et type d'images traitées.

## 2.2. Notre méthode de détection de l'axe médian

Notre approche s'applique directement sur les images en niveaux de gris de manuscrits anciens. Elle combine les aspects de différentes catégories citées ci-dessus, offrant un suivi souple et une détection de l'axe médian du tracé plus précise et robuste aux dégradations. Pour cela, nous nous sommes inspirés de différentes méthodes de squelettisation des vaisseaux sanguins sur des images médicales (Xu *et al.*, 2007 ; Frangi *et al.*, 1998). Les vaisseaux sanguins ont des propriétés comparables à celles des traits noirs de l'écriture (voir la figure suivante) c'est la raison pour laquelle notre choix s'est porté sur ce type de méthodes.



**Figure 3.** (a) Image de manuscrit ancien latin du Moyen Âge (*Cursive Gothique de style Formata*), (b) Image d'une rétine issue de l'imagerie médicale par rayon X (*Base de donnée DRIVE*).

Notre méthode unifiée combine les différents concepts cités précédemment et elle se déroule de la façon suivante :

- la méthode de Frangi (Frangi *et al.*, 1998) (utilisée à l'origine pour détecter des vaisseaux sanguins de propriétés comparables à celles des traits noirs de l'écriture) est appliquée directement sur l'image initiale pour mettre en évidence le tracé par rapport au fond. Le résultat subit un lissage gaussien pour enlever les discontinuités, les trous, les bruits ou les déformations qui peuvent être présents sur le tracé.

- la transformée de distance de Chamfer est appliquée sur la carte de Frangi pour déterminer d'une manière automatique le rayon (distance par rapport au point contour le plus proche) de chaque point du tracé. Ceci nous libère de tous les inconvénients liés à l'utilisation d'un rayon avec une taille fixe dans la méthode de Xu et offre à notre méthode une meilleure adaptation au changement d'épaisseur de traits.

- le suivi de l'axe médian repose, d'une part, sur une squelettisation par diffusion (Yu et Bajaj, 2004) de la carte de Frangi et d'autre part sur le principe de la méthode de Xu adapté à notre application. Nous avons amélioré la méthode de Xu en utilisant à chaque point la combinaison de deux directions complémentaires :

- a) la direction géométrique pour assurer une certaine robustesse aux situations indésirables de bifurcations et de croisement.
- b) la direction dynamique basée sur l'intensité lumineuse pour garantir un suivi robuste au changement soudain d'orientation ou d'épaisseur le long des traits.

Cette dernière utilise une fenêtre de taille dynamique pour chercher le point suivant qui va appartenir à l'axe médian. La taille de la fenêtre varie automatiquement selon que l'on se situe dans le cas d'une bifurcation, d'un croisement ou d'une ligne droite.



**Figure 4.** Détection des points de départ sur les deux types d'images.

Les étapes de notre méthode de suivi et de détection de l'axe médian sont résumées dans l'algorithme suivant :

---

*a) Initialisation*

- Détecter les points de départ issus de la diffusion. Un point est considéré comme point de départ si son intensité lumineuse est maximale par rapport à ses voisins,
- Extraire le rayon de chaque point de départ,
- Commencer à partir du premier point de départ de la liste,
- Déterminer le point suivant  $P_{k+1}^0$  en utilisant  $d_k$  « Look ahead Distance »,
- Calculer sa direction  $\Psi_{k+1}^0$  (direction de gradient de diffusion),

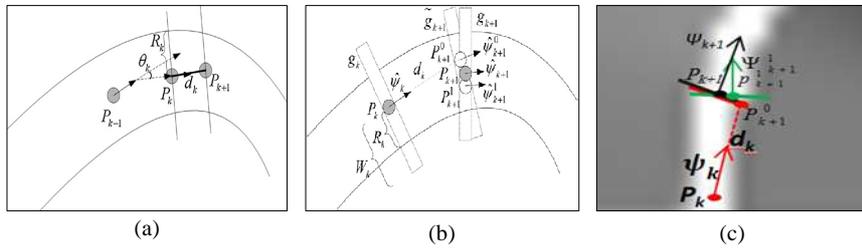
*b) Détermination du point suivant et ajustement de sa position*

- Tracer perpendiculairement à la direction  $\Psi_{k+1}^0$  un profil de la densité  $g_{k+1}$  du point  $P_{k+1}^0$ .
- Mettre à jour de la direction dans  $\Psi_{k+1}^1$  afin de déterminer le point suivant  $P_{k+1}^1$  qui aura la valeur du rayon calculée précédemment,
- Procéder de la même façon par calcul du profil de densité pour avoir le point  $P_{k+1}^1$ , point de convergence au centre du trait. Calculer sa direction  $\Psi_{k+1}^1$ ,
- Marquer ce point comme un point visité, de cette façon il ne sera pas visité une autre fois par le suivi de tracé. Et passer au point suivant.
- Répéter l'étape (b) le long du trait jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt de suivi d'un seul graphème soit atteint puis recommencer cette étape par le point de départ suivant dans la liste pour suivre le graphème prochain.

c) Critères d'arrêt

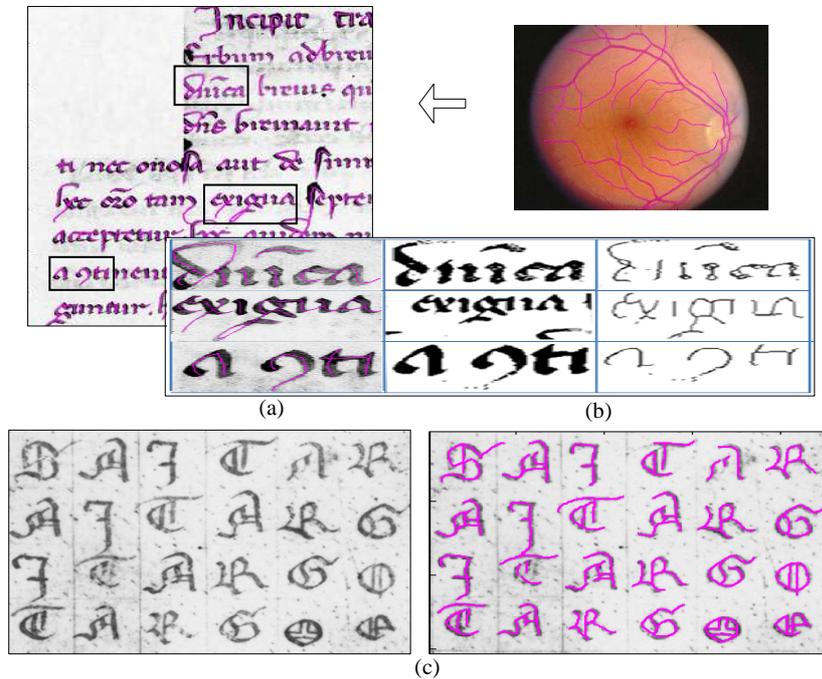
- Critères d'arrêt de suivi d'un seul graphème : Si le suivi du tracé rencontre un point de bifurcation déjà visité, il s'arrête. S'il arrive à un point marqué comme point de départ, il l'enlève de la liste des points de départ puis il s'arrête.

- Critères d'arrêt de l'algorithme de suivi : Si un des deux premiers critères d'arrêt est vérifié et la liste de points de départ est vide, arrêter l'algorithme de suivi.



**Figure 5.** (a) La distance Look-ahead  $d_k$  entre les points  $P_k$  et  $P_{k+1}$ , (b et c) Suivi du tracé et extraction de l'axe médian.

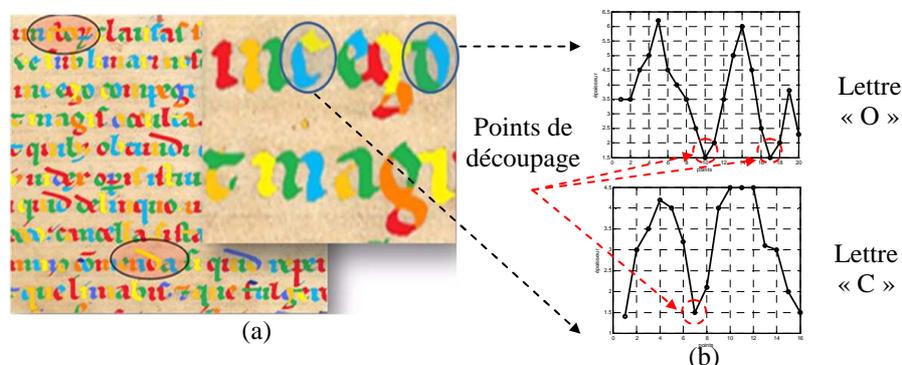
La figure suivante montre le résultat de l'extraction de l'axe médian par notre méthode qui est nettement meilleur que celui obtenu par la méthode classique de Zhang. Nous remarquons que notre méthode a bien détecté l'axe médian, même dans les situations où l'encre était dégradée ou très claire.



**Figure 6.** (a) Extraction de l'axe médian par notre méthode sans binarisation, (b) binarisation par la méthode de Sauvola et extraction de l'axe médian par la méthode de Zhang., (c) résultat de notre méthode sur un manuscrit dégradé (encre claire, bruit, trait effacé).

### 2.3. Découpage de tracé en graphèmes

D'un point de vue méthodologique, la segmentation des traits en graphèmes cohérents est réalisée le long de l'axe médian de la façon suivante : entre chaque point de départ et d'arrêt, tous les points impliqués dans la formation d'un trait sont sauvegardés dans une liste avec leurs directions et épaisseurs. Les points d'épaisseur minimale (minimum local) sont ensuite marqués et proposés comme point de découpage, comme cela est effectivement le cas dans la formation d'un trait. Chaque segment du tracé a une couleur différente. On identifie par cette approche les zones de croisements, les points de lever et de poser de plume. La décomposition présentée dans la figure 7(a) montre que les lettres sont constituées de fragments adjacents rattachés aux points d'épaisseur minimale supposés correspondre souvent à des points de poser et de lever de plume. Comme le montrent les courbes de la figure 7(b), la lettre « C » est découpée une seule fois alors que la lettre « O » est découpée deux fois.



**Figure 7.** (a) Exemple de décomposition des traits en graphèmes par notre méthode, (b) Courbes des épaisseurs des points de l'axe médian des lettres « O » et « C », et points de découpage en graphèmes.

Afin de construire avec robustesse une table de codage pour chaque page manuscrite à partir de ces graphèmes découpés, nous nous sommes intéressés à une approche innovante de regroupement des graphèmes similaires utilisant le concept de coloration de graphes, jamais exploitée dans un tel contexte. Cette méthode n'exige pas la connaissance a priori du nombre de classes, ni un apprentissage préalable et permet d'offrir une bonne homogénéité intra-classes et une bonne disparité inter-classes. Elle s'adapte mieux à la nature des graphèmes réellement présents, à l'inverse des méthodes conventionnelles qui nécessitent l'introduction préalable du nombre de classes et l'étiquetage manuel des graphèmes durant l'apprentissage en introduisant des erreurs éventuelles à chaque niveau d'intervention de l'utilisateur. On peut citer, à titre d'exemple, la méthode de (Zhu *et al.*, 2009) et la méthode de (Kumar *et al.*, 2010) qui sont basées sur les SVM et la méthode de (Schomaker *et al.*, 2007) basée sur une carte de Kohonen.

### 3. Principe théorique de la coloration de graphes

La coloration de graphes constitue une branche très importante de la théorie des graphes. Ses applications sont nombreuses dans différents domaines scientifiques (optimisation des réseaux de transports ou de communication, des formules chimiques, etc.). Les définitions de la coloration sont simples et de véritables problèmes de recherche peuvent être posés sous une forme bien structurée dont la formulation peut recouvrir de grandes difficultés pratiques. Ce modèle a été introduit la première fois dans le domaine de documents par (Gaceb et Eglin, 2008) qui l'ont adapté à toutes les étapes d'analyse des documents (de l'extraction de la structure physique à la reconnaissance) pour consolider la coopération et assouplir les échanges d'information entre les différents modules. Grâce à sa simplicité et son potentiel en matière de classification, nous avons pu imaginer une méthode originale

de construction d'une table de codage représentative de la distribution des graphèmes de l'écriture et de leurs fréquences d'apparition.

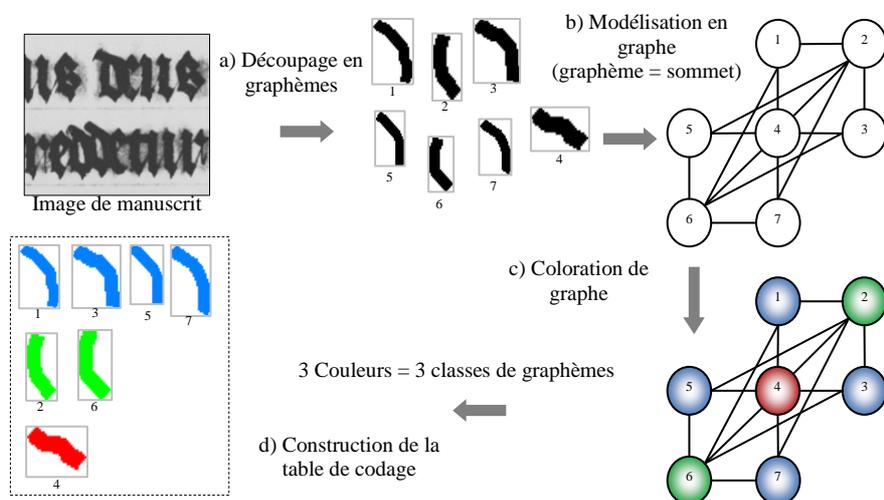
### **3.1. Types de colorations existantes**

Il existe plusieurs types de colorations de graphe : la coloration de sommets à laquelle nous nous sommes intéressés, la coloration d'arêtes, la coloration par liste, etc. (Gaceb et Eglin, 2008 ; Paschos 2007). Une coloration de graphes  $G(V,E)$  est une fonction qui affecte une couleur à chaque sommet et qui est telle que deux sommets reliés par une arête (adjacents ou voisins) n'ont pas la même couleur (contrainte de propreté). Les couleurs (ou entiers) attribuées aux sommets du graphe servent uniquement à regrouper les sommets en classes.

### **3.2. Modélisation du problème de classification de graphèmes en termes de coloration**

Le regroupement d'un ensemble  $X=\{x_1, \dots, x_n\}$  de  $n$  graphèmes en plusieurs groupes homogènes se base sur un principe simple : chaque groupe doit réunir le plus de graphèmes similaires. Les regroupements portent sur un critère de similarité  $S$ . Les paires de graphèmes qui vérifient ce critère de similarité (distance ou dissimilarité inférieure à un seuil par exemple) seront regroupées. De même les paires de graphèmes  $\{x_i, x_j\}$  qui ne vérifient pas ce critère ne peuvent être fusionnées au sein d'un même groupe. Pour résoudre ce problème de partitionnement (ou de classification), il est possible de formuler la question suivante : quel est le plus petit nombre de groupes homogènes que l'on peut former en respectant la contrainte  $S$ . L'intérêt de formuler le problème de cette manière, est qu'il devient alors possible de le modéliser en termes de coloration de graphes. Le positionnement du problème est alors le suivant : nous représentons chaque graphème  $x_i$  par un sommet  $v_i \in V$  d'un graphe simple  $G$  et nous ajoutons une arête  $E(v_i, v_j)$  entre chaque paire de graphèmes dissemblables (qui ne respectent pas la contrainte  $S$ ).

La coloration des sommets du graphe  $G(V,E)$  consiste alors à affecter à tous ses sommets une couleur de telle sorte que deux sommets adjacents (dissemblables) ne puissent pas porter la même couleur. Ces couleurs vont correspondre aux différents groupes homogènes qui constituent les différentes classes de graphèmes. Dans ce problème de regroupement, la question de la détermination du plus petit nombre de groupes homogènes, revient à rechercher le plus petit  $k$  pour lequel le graphe  $G$  correspondant admet une  $k$ -coloration : c'est donc précisément le nombre chromatique  $\chi(G)$  du graphe  $G$  qu'il faut déterminer. De plus, cette modélisation présente l'avantage de gérer facilement plusieurs sortes d'ambiguïtés inhérentes à la forme des graphèmes par rapport aux mécanismes de regroupements classiques.



**Figure 8.** Etapes de construction d'une table de codage par coloration de graphes.

#### 4. Construction de la table de codage

La première étape consiste à produire une description vectorielle de chacun des graphèmes, qui sera ensuite traitée pour définir les critères de similarité nécessaires à la classification. Nous avons utilisé, deux types caractéristiques : caractéristiques topologiques et les moments de Zernike.

##### 4.1. Extraction des caractéristiques

La description de la forme des graphèmes est une étape importante pour la construction d'une table de codage. Si le graphème a une forme simple, a une silhouette compacte ou une frontière convexe, sa description peut être donnée en termes géométriques comme l'aire, le périmètre, la courbure, la direction, les moments, etc. Au départ, on produit une description vectorielle de chacun des graphèmes, qui sera ensuite traitée pour définir les critères de similarité nécessaire à la classification. Pour cela, deux descripteurs sont utilisés : un descripteur de 15 caractéristiques topologiques et un descripteur de 25 moments de Zernike.

##### 4.1.1. Caractéristiques topologiques

Dix caractéristiques de forme ont été extraites à partir des graphèmes binaires. La longueur et la largeur du graphème sont utilisées pour différencier les styles d'écriture ainsi que la plume utilisée. L'orientation permet de connaître l'inclinaison du graphème et de différencier les différents mouvements d'exécution d'écriture. L'excentricité permet de savoir la forme globale du graphème. L'épaisseur permet de connaître l'épaisseur de la plume et le style d'écriture. Par exemple dans les écritures gothiques l'épaisseur de la plume est grande ce qui n'est pas le cas des

écritures modernes utilisant des stylos fins. Les trois dernières caractéristiques sont reliées à la surface qu'un graphème occupe dans un manuscrit par rapport aux autres.

Cinq caractéristiques de courbure (directions de la plus grande et de la plus petite courbure, les courbures Gaussienne et moyenne et le Laplacien de la courbure) sont extraites à partir des graphèmes en niveau de gris et sont calculées à partir de la matrice Hessienne (Yaxuan, 2004). Elles représentent la forme des courbes de graphèmes et reflètent les propriétés structurelles, telles que la convexité et la concavité. Leur rôle est important car elles sont des indicateurs essentiels permettant de différencier le style et l'époque de l'écriture. La combinaison des caractéristiques joue un rôle très important dans la construction de la table de codage et la classification des manuscrits.

La combinaison de plusieurs caractéristiques a aussi été adoptée dans d'autres travaux similaires pour augmenter la qualité des résultats. (Bulacu et Schomaker, 2006, 2007) ont combinés trois types de caractéristiques : la probabilité de densité (PDF) directionnelle jointe calculée sur les contours, la probabilité de la densité des graphèmes binaires et les Run-length PDFs. Les auteurs ont montré que chaque caractéristique isolée ne peut pas assurer une séparabilité suffisante pour la construction d'une table de codage représentative avec un classifieur de type KPPV «Leave one out». Les tests sur des manuscrits médiévaux montrent que cette combinaison donne des résultats nettement meilleurs que ceux obtenus avec l'entropie, l'auto-corrélation et les ondelettes (Brink *et al.*, 2008). Une autre formule d'alliance de caractéristiques a été proposée par (Dalitz et Karsten, 2005) pour chercher des mots ou des caractères similaires sur des images historiques de notes musicales. La méthode combine les moments de Zernike, les moments conventionnels et 64 densités calculées sur une grille 8×8. Dans le tableau suivant, nous avons résumé les différentes méthodes liées à la construction de la table de codage.

Article	Caractéristiques	Base	Algorithme
Bulacu et Schomake, 2006	PDF directionnelle jointe basé sur les contours, PDF du graphème, Run-length PDFs	900 écrivains	KPPV. Neyman-Pearson
Schomaker et al., 2007	PDF de composantes connexes	250 écrivains	Distance de Hamming
Bulacu et Schomaker, 2007	PDF de composantes connexes	700 écrivains	$\chi^2$ Distance
Balacu et Schomaker, 2005	PDF de composantes connexes	465 écrivains	K-means, Kohonen SOM 1D et 2D. KPPV, Distance $\chi^2$

Schomaker et al., 2003	PDF du contour	250 écrivains	KPPV
Brink et al., 2008	Hinge, Fraglets, runW,Brush	501 écrivains	KPPV

**Tableau 2.** Différentes méthodes de construction de la table de codage.

4.1.2. Moments de Zernike

Les 25 moments de Zernike utilisés pour décrire les graphèmes sont classés parmi les moments orthogonaux (géométrique, de Legendre, etc.) car ils possèdent la propriété d'invariance à la rotation.

Le moment de Zernike d'ordre  $n$  avec la répétition  $m$  ( $n - |m|$  est paire et  $|m| < n$ ) est définie par :

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) \cdot V_{nm}(\rho, \theta) \quad [1]$$

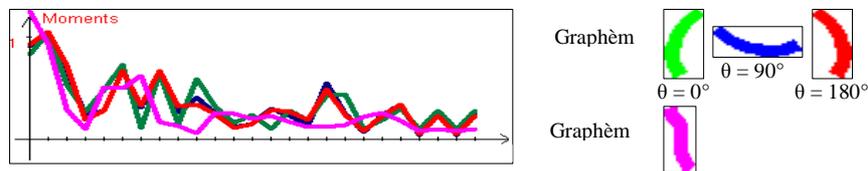
$V_{nm}(\rho, \theta)$  est un ensemble de polynômes complexes dans l'espace à deux dimensions qui forme un ensemble orthogonal sur l'intérieur du cercle unité ( $x^2+y^2=1$ ), avec :

$$V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm} e^{im\theta} \quad [2]$$

où  $\rho$  est la longueur du vecteur d'origine au point de coordonnées  $(x, y)$ .  $\theta$  est l'angle entre le précédent vecteur et l'axe des abscisses.  $R_{n,m} = R_{n,-m}$  est un polynôme radial défini comme suit :

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} \quad [3]$$

Pour calculer les moments de Zernike, le centre de chaque graphème binaire est pris comme origine du repère et les coordonnées des pixels de l'image sont transformées de manière à être dans le domaine du cercle unité. Comme nous l'avons signalé précédemment les moments de Zernike sont invariants seulement à la rotation. Pour les rendre invariants au changement d'échelle (Teague, 1980), il faut normaliser l'image binaire du graphème par le moment du premier ordre  $m_{00}$  défini comme étant la surface du graphème.



**Figure 9.** Invariance à la rotation des 25 moments de Zernike ( $n=8$ ).

#### 4.2. Mesure de similarité

La dissimilarité entre  $v_i$  et  $v_j$  est donnée par la distance généralisée de Minkowski d'ordre  $\alpha$  ( $\alpha = 2$  : distance euclidienne).

$$D_s = \left( \sum_{k=1}^{N_c} g_k (v_i^k, v_j^k)^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad [4]$$

$N_c$  est la longueur des vecteurs des caractéristiques.  $g_k$  est la fonction de dissemblance qui compare les caractéristiques deux à deux.

#### 4.3. Construction du graphe

La construction d'un graphe  $G$  à colorer à partir d'un ensemble  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  de  $n$  graphèmes (où chaque sommet  $v_i$  correspond au vecteur descripteur de graphème  $x_i$ ) est principalement basée sur le calcul de la matrice de distances  $MD_s$ . Cette matrice traduit les dissimilarités  $D_s(x_i, x_j)$  existant entre les paires de graphèmes  $(x_i, x_j)$  données par la relation suivante :  $MD_s[v_i, v_j] = D_s(x_i, x_j)$  avec  $i \in [1, n]$  et  $j \in [1, n] \mid (i \neq j)$ . Une fois  $v$  calculée, nous associons à  $X$  un graphe seuil supérieur  $G_{\geq S} = (V=X, E_{\geq S})$  en utilisant la relation suivante :

$$E_{\geq S} [v_i, v_j] = \begin{cases} 1 & \text{si } D_s(x_i, x_j) = D_s(v_i, v_j) \geq S \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad [5]$$

Pour ne pas confondre le terme adjacence (ou voisinage) avec le terme similarité, il faut noter que deux sommets sont adjacents s'ils ont une dissimilarité supérieure au seuil  $S$ . Le seuil  $S$  est également nommé seuil d'adjacence. Ce seuil peut être ajusté manuellement en s'aidant de l'expertise des paléographes par exemple ou automatiquement en maximisant la qualité de classification  $\psi$  donnée par (Gaceb et Eglin, 2008) :

$$S^{optimal} = \arg \max (\psi (S_i)) \quad [6]$$

#### 4.4. Classification des graphèmes

Une fois le graphe  $G$  construit à partir de l'ensemble des graphèmes, on applique l'algorithme de coloration de (Gaceb et Eglin, 2008). Les différentes couleurs résultantes représentent les classes de graphèmes.

### 5. Résultats et application

Nous présentons ici le résultat de l'application de notre méthode de décomposition en graphèmes sur 12 pages de textes manuscrites du Moyen-âge de différents types (voir figure 10). Un ensemble de 4863 graphèmes répartis de la façon suivante a été extrait des douze pages manuscrites :  $\{p1=343, p2=583, p3=643, p4=248, p5=398, p6=528, p7=564, p8=316, p9=499, p10=193, p11=269, p12=279\}$ . Cette décomposition a été soumise à la validation des experts paléographes et a obtenu leur approbation.



Figure 10. Extraits des 12 manuscrits.

La figure suivante montre un extrait de la table de codage construite à partir des graphèmes de la page *p1* par coloration de graphes. Il est important de noter ici que les descripteurs topologiques ont permis de mettre en évidence la dynamique dans la formation du tracé : les graphèmes qui présentent ainsi les mêmes particularités de mouvement (arrondis droits ou gauches) de la plume sont regroupés dans une même classe. Une vérification complète réalisée par les experts paléographes permet de l'attester.

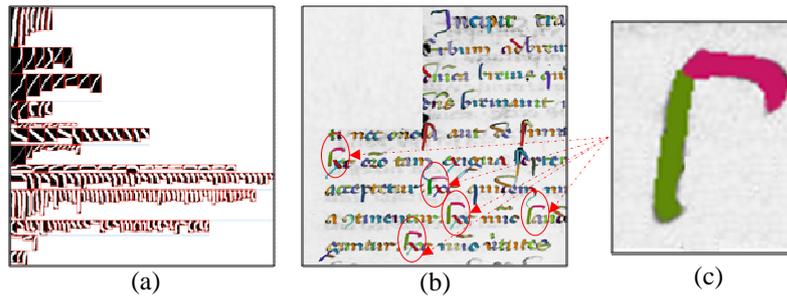


Figure 11. (a) Table de codage de la page *p1* (13 classes de graphèmes,  $S=0.3$ ), (b) graphèmes colorés superposés sur l'image originale, (c) occurrences d'une lettre.

Pour reconnaître le style des manuscrits chacune des 12 pages manuscrites  $p_i$  est représentée par sa table de codage  $cb(p_i)$  de  $k_i$  classes de graphèmes ( $k_i$  nombre chromatique de la coloration de graphes) avec  $cb(p_i) = \{c_1^i, \dots, c_{k_i}^i\}$ . Chaque classe  $c_i$  contient  $n_i$  graphèmes avec  $c_i = \{x_1^i, \dots, x_{n_i}^i\}$ . On peut donc estimer la similarité entre chaque paire de pages  $(p_i, p_j)$  par la distance  $dp$  suivante :

$$dp[cb(p_i), cb(p_j)] = \sup[dc(c_n, c_m)] | n=1..k_i \text{ et } m=1..k_j \quad [7]$$

Avec  $dc$ , la distance entre deux classes de graphèmes donnée par :

$$dc(c_n, c_m) = \min\{Ds(x_i \in c_n, x_j \in c_m)\} \quad [8]$$

Les distances  $dp$  entre les 12 pages sont illustrées dans le tableau suivant :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0											
2	0.7145	0										
3	0.391	0.459	0									
4	0.3063	0.679	0.3464	0								
5	0.1559	0.596	0.3353	0.2483	0							
6	0.5464	0.391	0.7943	0.5372	0.4591	0						
7	0.127	0.422	0.3173	0.3419	0.1755	0.3867	0					
8	0.4871	0.448	0.8065	0.5029	0.5351	0.5487	0.2362	0				
9	0.7056	0.231	0.8526	0.7685	0.6276	0.4637	0.4141	0.7529	0			
10	0.8062	0.206	0.728	0.6466	0.6261	0.4637	0.1435	0.7122	0.153	0		
11	0.3437	0.597	0.2586	0.1511	0.2446	0.1863	0.208	0.3852	0.555	0.5772	0	
12	0.3413	0.603	0.3659	0.1331	0.2381	0.3868	0.1741	0.3883	0.589	0.6152	0.2295	0

**Tableau 3.** Distances entre les codes book de pages.

Nous pouvons estimer à partir cette table que le style de la page  $p7$  est le plus proche de celui de la page  $p1$  puis de la page  $p5$ , et que le style de la page  $p2$  est plus proche de celui de la page  $p10$ , et ainsi de suite. Compte tenu de l'évidence visuelle facile à obtenir en observant les images de la base, cette distance est un indicateur efficace de similarités entre écriture. Ces premiers tests sont actuellement complétés par des tests en vraie grandeur sur la base paléographiques de 10000 images au sein de laquelle des différences plus difficiles à relever devront être mises en évidence.

## 6. Conclusion

Dans cet article, nous présentons une contribution majeure au projet ANR Graphem portant sur la mise en place d'une approche locale de caractérisation et de découpage des écritures du Moyen Age. Le principe consiste en une décomposition de l'image de textes en motifs élémentaires (graphèmes) qui servent de base à la comparaison des écritures. Sans chercher à segmenter les caractères dans les mots, la recherche de graphèmes similaires permet de caractériser une écriture médiévale : les écritures gothiques cursives possèdent en effet des formes de graphèmes particulières très différentes d'une écriture gothique textualis, par exemple. De même, la fréquence d'apparition des graphèmes apporte une information importante sur la régularité de l'écriture et sa qualité d'exécution (currens, libraria, formata, prescissa, etc.). C'est pour cette raison que la constitution de l'écriture en table de codage est fondamentale pour parvenir à une caractérisation et un classement efficace. Contrairement aux approches globales procédant par une analyse de texture, notre proposition d'approche locale à partir de l'analyse des graphèmes et de leurs redondances, permet d'utiliser pleinement les informations morphologiques et les terminaisons des lettres que seule la recherche de l'axe médian que nous proposons permet de mettre en lumière. Nous avons présenté une nouvelle méthode de découpage de l'écriture manuscrite en graphèmes et la construction de tables de codage des écritures bien adaptées aux exigences de notre domaine et aux besoins des experts paléographes. Pour cela, nous avons exploité la coloration de graphes qui s'est avérée être un outil de regroupement des graphèmes en classes très

puissant. En perspective de ce travail, nous envisageons de reconnaître automatiquement les styles et l'époque des manuscrits de la base complète paléographique de 10000 images. Ce travail sera intégré prochainement dans un prototype expérimental à l'usage des experts paléographes du projet GRAPHEM. Enfin, notons que les résultats de cette recherche pourront être appliqués à d'autres corpus d'images de manuscrits et permettre de trouver d'autres domaines d'application comme la classification des écritures des humanistes, le suivi des corrections des brouillons d'auteurs, l'authentification d'une écriture pour l'étude graphologique ou la police scientifique. Des pistes en ce sens sont d'ores et déjà à l'étude.

## 7. Bibliographie

- Ahuja N. et Chuang J.H., Shape Representation using a Generalized Potential Field Model, IEEE PAMI, Vol. 19, No. 2, pp.169-176, 1997.
- Aioli F., Simi M., Sona D., Sperduti A., Starita A., and Zaccagnini G. SPI : a System for Palaeographic Inspections. AIIA Notizie <http://www.dsi.unifi.it/AIIA/>, Vol. 4, pp. 34-38. 1999.
- Attali D., Squelettes et graphes de Voronoi 2D et 3D. PhD thesis, Université Joseph FOURIER, Grenoble I, 1995.
- Aylward S.R., Bullitt E., Initialization, noise, singularities, and scale in height ridge traversal for tubular object centerline extraction, IEEE Trans. Med. Imaging, Vol. 2, pp. 61-75, 2002.
- Baja D.L.S.G, Nystrom I., 2D Grey-level Skeleton Computation: A Discret 3D Approach, 17th International Conference on Pattern Recognition(ICPR'04), Vol. 2, p. 455-458, 2004.
- Blum H., A transformation for extracting new descriptors of shape, Symp. on models for percep. of speech & visualform, Mit Press, Boston, pp. 362-380, 1964.
- Brink et al, How much handwritten text is needed for text-independent writer verification and identification. Proc. of ICPR 2008.
- Bulacu, M., Schomaker, L., Writer style from oriented edge fragments, in CAIP Computer Analysis of Images and Patterns, pp. 460-469, 2003.
- Bulacu M. et Schomaker L., A comparison of clustering methods for writer identification and verification, Proc. of 8th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2005), IEEE Computer Society, Seoul, Korea, Vol. 2, pp. 1275-1279, 2005.
- Bulacu M. and Schomaker L., Automatic handwriting identification on medieval documents, Proc. of 14th Int. Conf. on Image Analysis and Processing (ICIAP 2007), IEEE Computer Society, Italy, pp. 279-284, 2007.
- Bulacu M. and Schomaker L., Combining multiple features for text-independent writer identification and verification, Proc. of 10th International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition (IWFHR 2006), France, pp. 281-286, 2006.

- Bullitt E., Aylward S., Bernard E., Gerig G., Technical report: Computer-assisted visualization of arteriovenous malformations on the home PC, *Neurosurgery*, Vol. 48, pp. 576–583, 2000.
- Cheriet M., Doré V., Amincissement-sans-segmentation et rehaussement des images de niveau de gris par un filtre de chocs utilisant des champs de diffusion, *I-Revues, Traitement du Signal*, –Vol. 23, TS – N° 1, 2006.
- Choi W.P., Lam K.M., Siu W.C, Extraction of the Euclidean skeleton based on a connectivity criterion, *Pattern Recognition*, Vol. 36, N° 3, 2003
- Chung D.H. et Sapiro G., Segmentation-Free Skeletonization of Gray-Scale Images via PDE, in *proc. Int Conference on Image Processing*, Vol. 2, pp. 927-930, 2000.
- Crettez, A set of handwriting families: style recognition," in *Proc. of the Third International Conference on Document Analysis and Recognition*. Montreal: IEEE Computer Society, August 1995, pp. 489-494.
- Dalitz C. et Karsten T., Using the Gamera Framework for Building a Lute Tablature Recognition System. *Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, pp. 478-481, 2005.
- Danielsson P.E., Euclidean Distance Mapping, *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 14, pp. 227-248, 1980.
- Frangi A.F., Niessen W.J., Vincken K.L., Viergever M.A., Multiscale Vessel Enhancement Filtering, *MICCAI '98*, pp. 130-137, 1998.
- Gaceb D. et Eglin V., Improvement of postal mail sorting system. *IJDAR*, Vol. 11, N° 2, pp. 67-80, 2008.
- Grigorishin T., Abdel-Hamid G., Yang Y.H., Skeletonisation: An Electrostatic Field Based Approach, *Pattern Analysis & Applications*, Vol. 1, pp. 163-177, 1998.
- Kang K. et Kim J. H., Utilization of Hierarchical, Stochastic Relationship Modeling for Hangul Character Recognition. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Vol. 26, N° 9, pp. 1185-1196, 2004.
- Kuckuck, W., Writer recognition by spectra analysis, in *Proc. Int. Conf. In Security through Science Engineering*, 1980, pp.1-3.
- Kumar J., Abd-Almageed W., Kang L., Doermann D., Handwritten Arabic Text Zone Detection using A Shape Codebook. *ICPR*, 2010.
- Lee S.W., Lee D.J., Park H.S., A new methodology for gray-scale character segmentation and recognition, *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on*, vol. 18, N° 10, pp. 1045 - 1050, 1996. ISSN: 0162-8828.
- Lorigo L. M. et al, Co-dimension 2 geodesic active contours for MRA segmentation, in *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, vol. 1613, pp. 126–139, 1999.
- Teague M.R., Image analysis via the general theory of moments, *J.opt.soc.Am*, Vol.70, N°8, pp. 920-930, 1980.

- Maio, D. Maltoni, Direct Gray-Scale Minutiae Detection in Fingerprints, IEEE Transactions on PAMI, Vol. 19, N° 1, pp. 27-40, 1997.
- Paschos V., Livre, Optimisation combinatoire : problèmes paradigmatiques et nouvelles problématiques, Lavoisier, France, pp. 270, 2007.
- Pervouchine V., Leedham G., Melikhov K., Handwritten character skeletonisation for forensic document analysis. In Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Applied Computing, Santa Fe, New Mexico, 2005. ISBN:1-58113-964-0.
- Peteri R., Celle J., Ranchin T., Detection and extraction of road networks from high resolution satellite images, International Conference on Image Processing, Vol.1, pp I-301-4, 2003.
- Poz D. A. P., Zanin R. B., Do Vale G. M., Automated extraction of road network from medium and high-resolution images, Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 16, N° 2, pp 239-248, 2006.
- Rosenfeld A. and J.L. Pfalz. Distance Functions on Digital Pictures, Pattern Recognition, Vol. 1, pp. 33-61, 1968.
- Said H.E.S, Peake G.S., Tan T.N., Baker K.D. Writer identification from non-uniformly skewed handwriting Images, British Machine Vision Conference, pp. 478-489, 1998.
- Schmidt M., Some ex. of algo. analysis in comput. geometry by means of math. morphology techniques” Geometriy anJ Robotics , Boissonnat and Laumond ed., Lecture Notes in Computer Sc. Springer-Verlag, Berlin, 391, 1989.
- Schomaker L., Bulacu M., Van Erp M., Sparse-parametric writer identification using heterogeneous feature groups”, Proc. of Int. Conf. on Image Processing (ICIP 2003), IEEE Press, Barcelona, Spain, Vol. 1, pp. 545-548, 2003.
- Schomaker L., Franke K., Bulacu M.. using codebooks of fragmented connected-component contours in forensic and historic writer identification. Pattern Recognition Letters, Vol. 28, N°6, pp. 719-727, 2007.
- Siddiqi K., Bouix S., Tannenbaum A., Zucker S.W., Hamilton-Jacobi skeletons, Int. Journal of Computer Vision, Vol. 48, N°3, pp.215-231, 2002. Doi:10.1023/A:1016376116653.
- Su Z., Cao Z., Wang Y., Zhen X., Identification of unreliable segments to improve skeletonization of handwriting images, Pattern Analysis & Applications, Springer, London, 2009. DOI: 10.1007/s10044-009-0166-x.
- Suh J.W., Kim J.H. Stroke extraction from gray-scale character image, Progress in Handwriting Recognition, pp. 593-598, 1997.
- Sun Y., Automated identification of arterial contours in coronary arteriograms by an adaptive tracking algorithm, IEEE Trans. Med. Imaging , Vol. 8, pp. 78-88, 1989.
- Tomai C.I., Zhang B., Srihari, S.N., Discriminatory power of Handwritten words for writer recognition, in International Conference on pattern Recognition, pp.638-643, 2004.
- Wilson D. L. et Noble J. A., An adaptive segmentation algorithm for time-of-flight MRA data, IEEE Trans. Med. Imag., Vol. 18, pp. 938-945, 1999.

- Xu Y. et al., An improved algorithm for vessel centerline tracking in coronary angiograms, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 88, n° 2, Pages 131-143, 2007.
- Yaxuan Qi. Fingerprint Ridge Line Reconstruction. *Intelligent Information Processing*, pp. 211-220, 2004.
- You X., Fang B., Tang Y.Y., He Z. and Huang j., Locating Vessel Centerlines in Retinal Images Using Wavelet Transform: A Multilevel Approach. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3644, pp. 688-696, 2005. DOI: 10.1007/11538059\_72.
- Yu Z., Bajaj C., A Segmentation-Free Approach for Skeletonization of Gray-Scale Images via Anisotropic Vectors Diffusion, *Proc. of 2004 IEEE Inter. Conf. on Comp. Vision and Patt. Recognition (CVPR'04)*, Washington DC, pp. 1063-1069, 2004.
- Zhang Y. and Zhou X., A novel tracing algorithm for high throughput imaging Screening of neuron-based assays, *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 160, N° 1, pp. 149-162, 2007.
- Zhu G., Yu X., Li Y., Doermann D., Language Identification for Handwritten Document Images Using A Shape Codebook. *Pattern Recognition archive*, Vol. 42 , N°12, pp. 3184-3191, 2009.