



LE TRAITEMENT DES IMAGES ET SON APPLICATION À L'HISTOIRE DU PAPIER

LA MESURE À GRANDE ÉCHELLE DE LA DENSITÉ DE VERGEURES

Le principe de la fabrication du papier est bien connu : lors de la formation d'une feuille sur la forme, une pâte végétale recouvre un tamis à travers lequel l'eau peut s'écouler (voir l'article de Jaques Bréjoux dans *GLM* n° 37, Automne 2000, p. 9-17). Les tamis traditionnels sont formés de fils parallèles denses appelés « vergeures », tenus en place par un nombre réduit de fils posés perpendiculairement aux premiers et appelés « fils de chaînette » (respectivement « laid lines » et « chain lines » en anglais). La structure du tamis laisse une empreinte dans le papier en conditionnant son épaisseur. Celle-ci peut être sentie au toucher et perçue à l'œil nu en tenant le papier devant une source de lumière.

La préparation de la pâte, la technique de réalisation du tamis, combinées aux particularismes régionaux et individuels, de même que la dégradation progressive du tamis, constituent autour de cet objet fonctionnel une histoire qui, mariée à la curiosité des hommes a accouché de l'historien du papier, espèce intéressée – en ce qui nous concerne – à déceler le mouvement des époques révolues dans les sillons des vergeures. Il y voit là le moyen de dater un papier, de pointer vers son lieu de production ou de soumettre à son œil critique la qualité du travail d'un moulin à papier.

L'étude des vergeures est encore un domaine en gestation, ayant longtemps été entravé par le manque de reproductions de papiers disponible en grande quantité et faciles d'accès. Le décompte manuel est lent et sujet aux erreurs. Des analyses sur quelques milliers de papiers constituent des volumes indispensables, mais qui ne seraient probablement pas envisageables sans une automatisation du décompte.

C'est pour cette raison qu'a été développé le logiciel AD751, destiné à la mesure rapide et performante de la densité de vergeures des papiers traditionnels. La création de l'outil qui est aujourd'hui mis à la disposition de la communauté scientifique, est due l'instigation et au soutien de Carlo Federici, anciennement directeur de l'*Istituto centrale per la patologia del libro* livre, ICPL, à Rome (<http://www.patologialibro.beniculturali.it>) et d'Ezio Ornato, CNRS, Villejuif (<http://lamop.univ-paris1.fr/W3/biblio/ornatoe.html>). Le logiciel a été présenté publiquement pour la première fois au XXVI^e Congrès de l'Association internationale des historiens du papier (Rome et Vérone, 26 août – 6 septembre 2002) et appliqué à grande échelle par Alessandra Fucini dans le cadre de la communication qu'elle a présentée à ce même Congrès (« L'evoluzione delle forme

in epoca tardo medievale attraverso l'analisi dei dati strumentali »). Les tests d'évaluation nécessaires à sa réalisation n'auraient pas été possibles sans l'existence de WILC, vaste base de données de reproductions de papiers de la Bibliothèque royale de La Haye, installée sur Internet par Gerard van Thienen (<http://www.kb.nl/kb/bc/incun/watermerken-en.html>).

UTILISATION DU PROGRAMME

AD751 – dont le nom rappelle l'année de la bataille d'Asie Centrale entre les troupes musulmanes et chinoises, suite à laquelle la technologie de fabrication du papier a entamé son périple vers l'Occident – est un programme libre de droits écrit par Vlad Atanasiu pour l'ICPL, et fonctionnant sous Windows 98/2000. Il a été écrit dans le programme Matlab 6.12, un standard de la recherche utilisé par les ingénieurs. L'interface graphique du AD751 est multilingue (allemand, anglais, français, italien). La capture d'écran de la **figure 1** présente le panneau des commandes.

Pour dénombrer les vergeures il faut au préalable disposer de reproductions de la structure du papier sous forme d'images numériques. Le programme accepte aussi bien des bétagraphies ou autres reproductions réalisées par rayonnement où la structure ressort souvent avec grande clarté, que des images de qualité plus basse, comme celles produites par la photographie de papiers par transparence, les frottis ou les copies d'images extraites de livres imprimés, abondamment tramés.

Il n'y a pas d'exigence spécifique quant à la taille des images ; mais plus elles sont petites, plus l'analyse sera rapide. Les formats graphiques acceptés sont jpg, tiff non compressé, bmp, png, pcx, hdf et xwd. Remarquons que même des fichiers jpg à taux de compression élevé peuvent être correctement analysés, bien qu'il soit préférable de fournir des images de haute qualité.

Pour obtenir des mesures exactes il est nécessaire de connaître la résolution de l'image numérique et son échelle, c'est-à-dire combien de millimètres (ou fractions de millimètre) représente un pixel. Des images de 512 x 512 pixels à 150 dpi à l'échelle 1:1 nous paraissent constituer une bonne solution.

Les images ne doivent pas contenir des parties où la trame du tamis est totalement invisible, comme dans le cas de coupures dans le papier ou de règles graduées superposées à celui-ci sur la reproduction. Un outil de recadrage permet néanmoins d'exclure ces zones une fois l'image chargée dans le logiciel. Dans le cas où les reproductions sont légèrement obliques par rapport à l'horizontale – qui constitue l'orientation naturelle des vergeures – AD751 prend en charge leur redressement automatique, bien qu'il soit souhaitable d'éviter la légère distorsion qui peut s'en suivre.

On peut traiter les images individuellement ou en série – cette dernière option permettant à l'utilisateur de disposer de son temps pendant que la machine travaille.

Pour l'analyse trois méthodes sont disponibles, dont les différences jouent sur le temps nécessaire à l'analyse et l'exactitude des résultats. Le mode « Hi-fi » détecte toutes les zones de l'image présentant vingt vergeures consécutives et détermine leur densité, c'est-à-dire la distance entre le milieu de la première vergeure et le point juste avant celui de la 21^e vergeure, distance divisée par 20. Cette méthode est la plus exacte, mais aussi la plus longue. Dans notre configuration PC Pentium III à 800MHz et 256 Mb RAM, pour une image moyenne de 500 x 400 pixels à 150 dpi et redressement automatique activé, elle a été d'environ 50 images par heure.

Le mode « Multi-spot » effectue d'abord une mesure du nombre de vergeures sur l'ensemble de la page pour évaluer la dimension approximative des zones pouvant contenir exactement 20 vergeures. L'image est ensuite divisée en zones égales, et pour chacune d'entre elles, à partir du nombre des vergeures qu'elle contient effectivement on infère la densité du tamis pour 20 vergeures. La vitesse enregistrée dans ce mode a été de 300 img/h, et la qualité de la réponse n'est que très légèrement inférieure à la méthode « Hi-fi ».

La méthode « globale » ne mesure la densité du tamis que de manière globale, en la déduisant de la distance entre la première et dernière vergeure de l'image – ce qui introduit, par rapport aux autres méthodes, une erreur d'approximation variant avec la qualité de l'image et la régularité du tamis. En contrepartie, ce mode permet d'atteindre une cadence de 400 img/h.

Une fois l'analyse achevée, le programme affiche et sauve dans un fichier-texte la densité de chacune des zones analysées, la densité moyenne, l'intervalle, l'écart-type et l'inclinaison des vergeures avant le redressement. Ces données peuvent par la suite être importées dans des feuilles de calcul ou dans des logiciels d'analyse statistique.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les images reproduisant la structure du papier sont une alternance régulière de bandes sombres et claires ; autrement dit, elles peuvent être considérées comme une onde générée par une source quasi stable (la main de l'artisan formaire) [fig. 2-1]. En appliquant une transformation mathématique – appelée *transformée de Fourier* – sur l'image, nous la décomposons dans une série d'ondes fondamentales. Celle qui représente les striures les plus régulières de l'image – en occurrence les vergeures – aura la plus forte amplitude. Localisé de cette manière, il suffit de lire sur l'image digitale de la transformée de Fourier les pixels qui séparent le maximum de l'origine du système de coordonnées (appelée « composante constante », au centre le la

figure 2-2) pour connaître le nombre de vergeures présentes sur la reproduction. L'inclinaison des vergeures est donnée par l'angle formé par la ligne qui joint le maximum à l'origine, et l'axe vertical (0° si les vergeures sont horizontales ou si l'image a été redressée).

Si cette solution est simple et élégante, dans la pratique on éprouve certaines difficultés à isoler le maximum correspondant aux vergeures à cause des « bruits » présents dans l'image. La reproduction idéale ne devrait comprendre que deux tonalités de gris – bandes noires et blanches par exemple –, d'une épaisseur égale et parfaitement parallèles. La répartition non uniforme de la pâte à papier sur le tamis lors du processus de fabrication produit un papier d'épaisseur inégale, donc une image avec des plages d'intensité de gris variable. La technique de reproduction et la qualité de l'image numérique introduisent, quant à elles, un autre type de bruit, dû à la décomposition de l'image en pixels qui donne à celle-ci un aspect "pointilliste". Pour atténuer ces inférences de basse fréquence il a fallu filtrer l'image en appliquant deux fois de suite un filtre dérivatif anisotropique (une seule fois pour les fichiers jpg fortement comprimés). Ce filtre produit une image ayant l'aspect d'un bas relief, où les zones ayant peu de variation d'intensité sont quasiment "plates", laissant clairement apparaître les contours de formes, où l'intensité change avec rapidité. De cette manière sont supprimées les lignes qui n'ont pas la même direction que les vergeures (les fils de chaînettes par exemple) et renforcés les traces de vergeures. [La **figure 2-3** présente la projection de la transformé de Fourier sur l'axe Y, après application du filtre.]

Dans le cas où les vergeures ne sont pas parallèles par suite de leur ondulation, la transformée de Fourier indique correctement qu'il existe plusieurs fréquences principales. Un maximum brouillé, entouré de valeurs proches, est un indice de non-parallélisme de vergeures. En pratique nous avons observé que sur des petites distances – comme celle déterminée par 20 vergeures – le signal est quasi-stable. Cela tient probablement au fait que les vergeures bougent sur le tamis plutôt de manière progressive et « collective » plutôt qu'individuelle. Cette considération a constitué une incitation supplémentaire à choisir comme unité de mesure 20 vergeures (et demie, si on préfère cette option, qui est une des traditions du milieu des historiens du papier ; le choix est laissé à l'utilisateur, mais il sera alors indispensable de le mentionner lors de la publication des résultats).

INTÉRÊT DU PROGRAMME

Comme pour tout procédé d'automatisation, l'intérêt principal de AD751 découle de la possibilité d'accélérer les analyses et se déchargeant sur la machine des tâches répétitives, et de permettre à l'humain de se consacrer à

des activités plus créatives. À titre indicatif, nous avons calculé qu'il faudrait neuf ans et demi de travail humain pour décompter « manuellement » la densité des vergeures de la totalité du million d'exemplaires d'incunables qui subsistent, alors que la même tâche ne réclamerait que quatre mois et demi avec AD751. Sans compter que AD751 fonctionne gratuitement, ce qui ne serait pas le cas de l'éventuel et encombrant vacataire affecté au décompte de vergeures.

Établir la densité du tamis est une activité dont les spécialistes ont souligné le caractère pénible : il n'est pas possible d'y travailler des heures et des jours d'affilée sur une longue période. De toute façon la qualité de l'observation décroît rapidement et les pauses s'imposent. D'autre part les valeurs sont toujours différentes d'un observateur à l'autre. AD751 garantit en revanche la stabilité de la précision.

Outre des meilleures performances dans la vitesse et la stabilité, le logiciel permet, par sa méthode d'échantillonnage multiple, une finesse d'analyse rarement rencontrée dans les comptages manuels. Si la densité peut s'établir à plusieurs endroits, on calcule la moyenne et c'est ce chiffre unique qui est indiqué dans les publications. AD751 préserve ces valeurs individuelles lors de l'affichage des résultats. La variation entre les zones permet alors non seulement une caractérisation quantitative du tamis, mais également une estimation de sa qualité.

En outre, lorsqu'on met à profit de centaines ou des milliers de papiers, la richesse des données résultantes est telle qu'il devient facile d'en tirer des informations valides, qu'autrement seule une longue expérience aurait pu inspirer.

QUELQUES PREMIERS RÉSULTATS

La réalisation d'AD751 a donné l'occasion de réfléchir aux façons dont le programme pourrait être utilisé et, puisqu'il fallait mettre à l'épreuve ses capacités, nous l'avons appliqué à ces directions de recherche. Nous avons ainsi effectué quelques sondages intéressants dont une première confirmation a été apportée par la communication déjà citée d'Alessandra Fucini.

La technologie du papier et la densité des vergeures

La statistique la plus utilisée pour donner des informations sur la structure des vergeures est la moyenne de leur densité. Si les différentes zones ont habituellement des valeurs différentes, la moyenne gommara les imperfections du tamis, qui paraîtra plus homogène même qu'avant sa première utilisation. La moyenne livre la densité idéale recherchée par le formaire.

Parallèlement à d'autres mesures, la densité moyenne peut servir à l'expertise de papiers, aider à juger leur similarité ou à déterminer s'ils ont

été produits par le même tamis ou appartenaient au même lot de papiers – ou plus précisément encore par le même tamis dans un laps de temps relativement bref, si on tient compte des déformations auxquelles il est sujet et de l'impact de l'humidité ambiante sur les dimensions du papier.

En analysant un grand nombre de papiers, la densité moyenne révèle une caractéristique intéressante, liée au développement de la technologie de fabrication. Sur la base de 300 papiers provenant d'incunables néerlandais, il est possible d'observer comment les imprimeurs de Pays-Bas passent graduellement, entre 1474 et 1500, de l'emploi de papiers ayant des vergeures à grand écartement (25 mm / 20 ½ lignes) à des papiers à densité plus réduite (18 mm). L'année 1480 marque le moment où les deux tendances se démarquent, la nouvelle tendance évinçant complètement l'ancienne en l'espace de deux ans seulement [fig. 3].

Les raisons de ce processus sont à chercher dans les progrès de la fabrication des fils vergeures, de plus en plus fins et réguliers, et dans l'utilisation d'une pâte mieux broyée, qui a besoin d'un tamis plus serré pour être soutenue.

Stocks de papiers et cohérence des achats

Il n'est pas surprenant que des imprimeurs ayant été en activité pendant une période aussi brève qu'une seule année, aient acheté et utilisé des stocks homogènes de papiers. Le peu de variation entre les densités moyennes de tous les papiers utilisés par un même imprimeur à la carrière courte ne laisse pas de doute sur ce point.

La grande variabilité de densités des papiers employés par des imprimeurs restés plus longtemps actifs indique, en revanche, qu'ils étaient peu soucieux ou peu capables de maintenir une gamme de papier homogène pour leur production livresque.

Densité de vergeures et qualité des papiers

Les tamis les plus serrés produisent en général les papiers les plus lisses, permettant une impression de lettres plus régulière, donc plus lisible et mieux appréciée esthétiquement. C'est un aspect à prendre en considération lorsqu'on étudie l'évolution du papier ou lorsqu'on évalue la qualité d'un livre.

L'ampleur de la variation de la densité de vergeures à divers endroits de la feuille est une mesure de la régularité du tamis, et implicitement de sa qualité au moment de la fabrication de la feuille. Lorsque l'intervalle de variation est important, il signifie que la forme a probablement été utilisée longtemps ou que le tamis a été cousu peu solidement. Quant à l'écart moyen, il nous apprend l'ampleur du défaut : les valeurs basses indiquent

des dommages localisés, les valeurs hautes une dégradation globale de la feuille.

Il devient alors possible de classer les imprimeurs en fonction de la qualité de leurs papiers, établie selon les critères précédents. Si l'on considère que Gheraert Leeu, d'Anvers, a été l'un des imprimeurs les plus prolifiques, la qualité des papiers utilisés pour ses livres ressort comme particulièrement bonne, compte tenu de l'intervalle restreint et de l'écart-type réduit de la variation de densité des vergeures. Sur la base du même raisonnement, en revanche, J. de Westfalia, à Louvain, semble avoir nourri ses presses de n'importe quel type de papier qu'il pouvait se procurer.

RÉCAPITULATIF ET DÉVELOPPÉMENTS POSSIBLES

Nous avons présenté ici un logiciel permettant l'automatisation de la mesure de la densité des vergeures. Sa précision est similaire à celle d'experts humains et la richesse des informations extraites supérieure. [

Le logiciel pourrait être développé en un kit pour l'analyse des papiers par l'addition de fonctionnalités permettant, par exemple, l'estimation de l'épaisseur des vergeures, l'écart entre les fils de chaînette ou leur positionnement par rapport au filigrane. Outre son rôle d'outil de recherche destiné aux historiens du papier, relier le programme à une base de données de papiers datés et localisés, accessible par Internet, permettrait à un cercle plus large d'utilisateurs potentiels de soumettre leurs propres reproductions de papier en vue d'une estimation de leur date et lieu de production en fonction de connaissances acquises.

Vlad ATANASIU

École pratique des Hautes Études, IV^e Section, Paris
atanasiu@excite.com

RÉFÉRENCES

Pour une présentation technique plus détaillée du programme, ainsi qu'une bibliographie technique plus fournie, le lecteur est invité à consulter l'article en ligne qu'il trouvera à la même adresse Internet que le logiciel lui-même (texte en langue anglaise) : <http://mywebpage.netscape.com/atanasiuvlad/ad751/>

Quelques références essentielles :

RUSS (John C.), *The Image Processing Handbook*, London : CRC Press, 2002, 800 p.

HILLS (Richard L.), "The Importance of Laid and Chain Line Spacing", in Monique Zerdoun Bat-Yehouda, *Le papier au Moyen Âge – histoire et techniques* (Turnhout: Brepols) 1999, 149-163.

ORNATO (Ezio), MUNAFÒ (Paola F.), STORACE (M. Speranza), *La carta occidentale nel tardo medioevo* (Rome : Istituto per la patologia del libro, 2001), vol. I, p. 101-106 : "L'importa degli elementi costitutive della forma: filoni e vergele".

ZERDOUN BAT-YEHOUDA (Monique), "Enquête sur les papiers non filigranés des manuscrits hébreux datés antérieurs à 1300", in *ibidem*, *Le papier au Moyen Âge...*, 85-103 (remarques similaires par P. Canart, *idem*, 343-4).

Bases des données sur Internet contenant des reproductions de la structure du papier :

National Library of the Netherlands Watermark web database : <http://www.kb.nl/kb/bc/incun/watermerken-en.html>

Kommission für Schrift- und Buchwesen des Mittelalters der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wasserzeichen des Mittelalters : <http://www.oeaw.ac.at/ksbm/wz/wzma/index2.htm>

Archive of Watermarks and Papers in Greek Manuscripts, by Robert W. Allison, Bates College, Lewinston, Maine, United States : <http://abacus.bates.edu/Faculty/wmarchive/index.html>

A Digital Catalogue of Watermarks and Type Ornaments Used by William Stansby in the Printing of "The Workes of Benjamin Jonson" (London: 1616), by David Gants : <http://jefferson.village.virginia.edu/gants/>

The Thomas L. Gravell Watermark Archive, at the Center of Applied Technology, Virginia, United States : <http://ada.cath.vt.edu:591/dbs/gravell/>