



LE PAPIER, UN MATÉRIAU COMPLEXE

Avec l'avènement de l'informatique, on annonçait sa mort. En fait, la demande de papier, non seulement ne fléchit pas, mais elle augmente. S'il remonte à la nuit des temps, c'est seulement au XIX^e siècle que son industrialisation a commencé.

Composé de millions de fibres dont chacune a son importance pour les propriétés finales, le papier est un produit complexe qui doit être fabriqué en masse, ce qui rend les procédés très pointus. Voilà pourquoi, avec l'EFPG, l'INP Grenoble met chaque année sur le marché des ingénieurs spécialisés.

Le papier, la belle histoire	P. 28
Voyage au cœur du papier	P. 30
L'industrie papetière au service de l'environnement	P. 32
Microtomographie aux rayons X : le papier sous toutes ses coutures	P. 34
Le raffinage à la loupe	P. 35
Industrie papetière mondiale : croissance prévue jusqu'en 2015	P. 36



LE PAPIER, LA BELLE HISTOIRE

Né en Chine vers la fin du III^e siècle avant l'ère chrétienne sous le règne des Qin, le papier a toujours accompagné l'activité et le développement de l'homme, assurant par là même l'essor des peuples qui en maîtrisaient la fabrication. Retour sur la naissance et le développement, jusqu'à la fin du XIX^e siècle, de ce vecteur de la culture et de la technologie.

Qui connaît Tsai Loun, ministre chinois de l'Agriculture ? Pas grand monde, sans doute. Pourtant, c'est lui qui, après la naissance en Chine vers la fin du III^e siècle avant l'ère chrétienne, codifie l'art de fabriquer le papier, en 105 après J.-C., en préconisant d'utiliser des fibres issues de bambou, des écorces de mûrier et surtout du lin et du chanvre. Le père du papier moderne en somme, et le rédacteur de la première certification "ISO 9000" pour la papeterie ! Cet art de fabriquer le papier restera chinois et japonais jusqu'au VIII^e siècle avant de passer chez les Arabes, à la



Nicolas Robert

suite de la bataille de Samarkand en 751. Ces derniers comprennent rapidement tout le profit qu'ils peuvent tirer du papier pour propager l'Islam.

Après l'introduction peu fructueuse du coton comme matière première fibreuse pour améliorer la blancheur, ils en font leur vecteur de communication numéro un. À ce titre, il peut être considéré comme le premier grand média de masse.

Dès lors, à mesure que les Arabes progressent vers l'Occident, le papier y fait son apparition : on le retrouve à Bagdad en 793, au Caire en 900, à Xàtiva (San Felipe, Espagne) en 1056, en Sicile en

1102, à Fabriano (Italie) en 1276 et en France au début du XIV^e. En 1184, Fès au Maroc comptait plus de 400 moulins à papier.



> La machine à fabriquer le papier "à grande étendue" inventée par Nicolas Robert au moment de la Révolution française

Vers 1440, nouvelle révolution : l'invention de la typographie (basée sur le principe de caractères mobiles) par Gutenberg dope l'utilisation et donc la fabrication du papier, qui deviendra complètement artisanale avec la généralisation des piles à maillets actionnées par l'énergie hydraulique. Les adeptes de la nouvelle église réformée choisissent à leur tour le papier pour assurer leur propagande. À l'époque, les artisans papetiers, majoritairement protestants, peuplent la France au premier rang parmi les nations papetières. Malheureusement, la révocation de l'Édit de Nantes en 1685 sonne à jamais le glas de la supériorité française dans ce secteur.



Aristide Bergès

C'est incontestablement le XIX^e siècle qui permet au papier d'acquiescer toutes ses lettres de noblesse et à son procédé de fabrication d'opérer sa grande mutation, en passant de l'artisanat à l'industrie lourde. Pour y parvenir, deux verrous résistent : la formation industrielle de feuilles ou de bobines de papier et l'approvisionnement en matières premières fibreuses.

Le premier verrou saute au moment de la Révolution française, grâce à Nicolas Robert qui invente la machine à fabriquer le papier "à grande étendue". Les principes de la fabrication industrielle à grande échelle sont posés.

Le second verrou résiste jusqu'au milieu du XIX^e. Face aux difficultés d'approvisionnement en chiffons de plus en plus grandes, notamment à cause de la flambée des prix, les papetiers recherchent de nouvelles matières premières. On pense alors tout naturellement au bois. Une idée qui n'a rien de nouveau : les Chinois avaient déjà fabriqué du papier à partir de fibres d'écorces et de bambous. Plusieurs tentatives d'utilisation du bois avaient même eu lieu au XVIII^e et au début du XIX^e, mais l'histoire ne les retiendra pas et attribuera l'invention de la première pâte de bois à un tisserand natif de Saxe : Friedrich Gottlob Keller, qui fabrique de la pâte méca-

nique au moyen d'une meule et dépose un brevet en 1844. Aristide Bergès reste l'un des grands promoteurs de cette pâte mécanique de meule. Il dépose trois brevets sur des améliorations du procédé et sur l'emploi de la pâte mécanique dans la fabrication des papiers. Il est également connu pour être le premier à domestiquer et à utiliser l'énergie "stockée dans les montagnes", qu'il nomme la Houille Blanche, pour faire tourner ses défibreurs à meule à Lancey, dans la vallée du Grésivaudan près de Grenoble.

En 1885, la pâte mécanique devient la matière première essentielle pour produire du papier journal, acceptée par la plupart des éditeurs de journaux aux États-Unis et au Canada. Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, des procédés chimiques sont mis au point pour obtenir des fibres à



Friedrich Gottlob Keller

partir du bois – les pâtes chimiques –. Ils permettent d'augmenter considérablement la solidité des papiers et par la même leur vitesse de production. Des développements rendus possibles par les travaux des chimistes de l'époque, dont le Français Anselme Payen, qui montrent que toutes les cellules végétales contiennent une substance blanche et fibreuse, chimiquement identique au coton des chiffons : la cellulose, nommée ainsi car constituant l'essentiel des cellules. Les procédés chimiques consistent donc à

extraire du bois les fibres cellulose à partir desquelles on fabrique du papier. Les fibres de coton ont vécu.

Gérard Coste (EFPG/IRFIP), président de l'association "Cellulose"

gerard.coste@efpg.inpg.fr



Anselme Payen

EN BREF...

L'apprentissage : une nouvelle voie de formation

Depuis 1994, L'EPPG offre à ses étudiants la possibilité de finir leur scolarité sous le statut d'apprenti ingénieur salarié pendant leurs deux dernières années d'études. L'enseignement est basé sur une pédagogie alternant les périodes en école et en entreprise.

Pour les étudiants, cette nouvelle forme de scolarité poursuit deux objectifs essentiels : professionnaliser davantage la formation tout en maintenant la qualité des connaissances de base de l'ingénieur, et intégrer plus rapidement des jeunes ingénieurs dans les entreprises.

De leur côté, les industriels contribuent à former des futurs cadres et disposent d'un vivier d'ingénieurs particulièrement bien préparés à leurs métiers.

À ce jour, environ cent cinquante étudiants ont choisi cette voie. Ils ont trouvé très rapidement un emploi dans les entreprises de leur spécialité. 90 % d'entre eux travaillent dans des unités de production où la rapidité de leur intégration a été appréciée. Ils ont fait remonter le pourcentage d'ingénieurs diplômés de l'EPPG exerçant une activité de production dans les usines.

En dix ans, la pédagogie de l'apprentissage a évolué. Les entreprises appréhendent maintenant bien mieux les types de projets formateurs qu'elles peuvent proposer aux apprentis et les maîtres d'apprentissage remplissent de mieux en mieux leur mission.

Une des grandes satisfactions de l'équipe pédagogique reste de voir des élèves ingénieurs s'épanouir au contact des réalités de l'entreprise.

VOYAGE AU CŒUR DU PAPIER

Des millions de fibres, dont chacune garantit les propriétés du produit final. Des adjuvants minéraux. Le papier est un matériau complexe produit en masse et à grande vitesse. D'où une variété de problèmes physiques et chimiques.

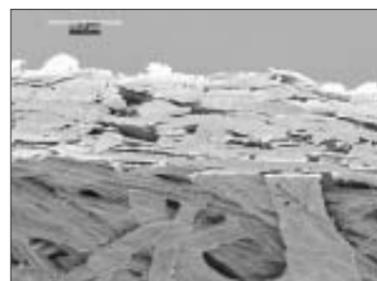
Aujourd'hui, une machine à papier moderne peut produire, à plus de 150 km/h, une feuille de 10 mètres de large d'une épaisseur de plus ou moins 2 microns. Dans son format A4, cette feuille contient entre 5 et 20 millions de fibres, soit une longueur cumulée de près de 30 km ! Ces chiffres traduisent bien les contraintes de cette industrie : contrôler l'assemblage d'une grande variété d'objets issus de cellules végétales vivantes, de la dimension de quelques centaines de microns, qui contribuent tous aux propriétés du produit final fabriqué à raison de plusieurs centaines de tonnes par jour. Le tout, avec des impératifs de régularité et de fiabilité de ses propriétés mécaniques, optiques et de texture. On imagine aisément la variété des problèmes physiques et chimiques rencontrés.

À papier particulier, fibre particulière

Les fibres végétales issues du bois constituent plus de 90 % de la masse de ces objets. Les 10% restants sont issues d'autres végétaux : pailles, coton, lin, chanvre, alfa, kénaf, jute, ramie, abaca, bambous, canne à sucre (son déchet, la bagasse). On trouve également quelques fibres artificielles ou synthétiques, pour des usages très particuliers (notamment dans les papiers sécurisés, tels les



> Fibres de pâte chimique d'eucalyptus



> Surface et coupe transversale dans un papier d'emballage.

chèques ou les billets de banque), des fibres minérales comme les fibres de verre utilisées dans certaines applications de filtration, des fibres animales tels la laine et le cuir et enfin des déchets de feuilles de tabac pour reconstituer des feuilles continues. Pour le plus grand nombre des papiers à utilisation courante, les fibres végétales issues du bois, vierges ou recyclées, suffisent à "construire" une feuille. En revanche, dès que les usages deviennent particuliers, les fibres provenant des autres végétaux prennent le relais : la variété de leurs morphologies permettent de développer des propriétés particulières.

Les trois propriétés du papier

Schématiquement, le papier est analysé suivant trois critères : les propriétés mécaniques de résistance (traction, déchirure, éclatement, pliage, flexion avec la rigidité statique et dynamique, abrasion, compression...); les propriétés optiques (blancheur, opacité, brillance...); les propriétés de texture, (grammage, main, porosité, capacité à transmettre la lumière de manière homogène, perméabilité à l'air et aux liquides...).

L'humidité et la température pouvant influencer sur ces quatre types de propriétés, ces dernières sont mesurées dans des atmosphères conditionnées dont les

évolutions doivent être connues et modélisées. Dans le même ordre d'idée, les conditions dynamiques d'application des contraintes pour mesurer les propriétés mécaniques doivent être maîtrisées. Ainsi, le papier ayant le plus souvent un comportement visco élastique, ses propriétés mécaniques doivent être mesurées à des vitesses parfois très lentes, pour simuler et prévoir, par exemple, le fluage des caisses en carton lorsqu'elles restent longtemps empilées.

Il existe d'autres critères, liés à des usages spécifiques. Ainsi les propriétés électriques des papiers (charge de surface, constante diélectrique) sont de plus en plus souvent contrôlées pour les procédés d'impression comme l'héliogravure (assistance électrostatique), la magnétographie ou la xérogaphie. Ces propriétés électriques s'avèrent également fondamentales pour les cartons utilisés dans les transformateurs de courant électrique aux sorties des centrales nucléaires qui travaillent à des tensions de plusieurs centaines de milliers de volts (voir encadré).

Vers l'infiniment petit

Au premier abord, rien ne ressemble plus à une fibre de bois... qu'une autre fibre bois. Les dimensions longitudinales et transversales varient peu entre les espèces d'une même essence. Les fibres



> Fibres de pâte chimique de chanvre



Machine à papier

issues des bois résineux s'avèrent cependant plus longues (2,5 mm en moyenne) que celles provenant de bois feuillus (1 mm en moyenne), ce qui les destine aux papiers d'emballages pour lesquels on recherche des propriétés de résistance.

À des échelles beaucoup plus petites, d'autres différences se révèlent. La paroi végétale est constituée de microfibrilles de cellulose dont les dimensions latérales sont parfois inférieures à la centaine de nanomètres. La structure de cette paroi se modifie pendant la fabrication de la pâte à papier, au cours du traitement de raffinage (voir l'article de Jean-Claude Roux p. X) et également au moment du recyclage et du désencrage, qui visent à redonner à la fibre ses propriétés initiales.

Souvent inférieurs à 100 nm, les pores interstitiels de cette paroi sont occupés par des molécules d'eau, des ions présents dans la suspension de fibres, et des molécules issues des adjuvants chimiques utilisés dans le procédé (anti-mousse, bactéricide, fongicide, flocculant, épaississant...), qui influent sur sa plasticité. Chaque fibre contribuant à la structure de la feuille, c'est donc à une échelle minuscule que se construisent les propriétés finales du papier.

Petite erreur, grands effets

Parmi les autres constituants majeurs des papiers et cartons, les adjuvants

minéraux occupent une place importante pour les propriétés optiques et celles de surface. Ces charges minérales (kaolin, carbonate de calcium naturel ou précipité, dioxyde de titane, talc, silice colloïdale) sont utilisées en charge de masse ou en enduction de surface notamment pour les papiers destinés à l'impression. Indices de réfraction, coefficients d'absorption et de diffusion de la lumière, granulométries, autant de propriétés mesurées sur ces produits. Principale difficulté : les dimensions très réduites de ces objets (souvent inférieur à 5

microns) nécessitent des agents de rétention et de floculation pour les retenir dans la feuille de papier, une fois introduits dans la masse.

Les grandeurs, comme le potentiel électrocinétique, les demandes ioniques doivent être mesurées avec précision dans la suspension pour prédire et contrôler les fractions retenues et leur distribution finale dans l'épaisseur de feuille qui conditionnent l'homogénéité des propriétés du papier.

Les charges utilisées en pigments de surface en mélange avec des liants organiques comme les latex, permettent de contrôler la rugosité et la porosité de surface, deux paramètres déterminants pour la pénétration des encres et donc de la qualité d'impression. Des variations de rugosité inférieures à 0,5 micron sur les papiers, ou celles liées à la migration hétérogène des liants organiques lors du séchage, peuvent provoquer des défauts d'impression comme le "moutonnement", phénomène visible à l'œil et particulièrement sensible dans les tons légers des impressions en héliogravure. À petite erreur, grands effets.

Christian Voillot, professeur EFPG, directeur de la communication EFPG
christian.voillot@inpg.fr

Du carton dans les centrales

Soumis à des tensions de plusieurs centaines de milliers de volts, les transformateurs de courant électrique aux sorties des centrales nucléaires doivent intégrer des diélectriques séparateurs de bobines aux propriétés spécifiques. Les nécessaires fiabilité et sécurité de ces transformateurs requièrent un choix délicat de leurs composants.

Fabriqué à partir de pâte kraft pure hyperlavée, par un procédé spécial de séchage/pressage, le carton épais multi-lamellaire est le matériau le plus adapté à cet usage compte tenu de ses propriétés mécaniques (rigidité), de sa bonne tenue diélectrique, de sa longévité en bain d'huile chaude, et de son faible coût.

EDF poursuit des recherches pour mieux comprendre les mécanismes de déclenchement d'arc électrique apparaissant sous écoulement d'huile à la surface des cartons, de manière aléatoire, qui, dans certains transformateurs aboutissent à leur destruction. Objectif de ces recherches : connaître plus précisément les phénomènes physiques et chimiques au sein des cartons et dans l'huile influençant ces risques.

Les enjeux sont importants car les avaries de transformateurs sont un phénomène mondial, non élucidé à ce jour, et représentent un coût économique très important. Les cartons en sont un des composants essentiels, et leur rôle, autre que mécanique, a été peu étudié à ce jour.

L'INDUSTRIE PAPETIÈRE au service de l'environnement

Elle détruit nos forêts et pollue notre atmosphère ? L'image de l'industrie papetière est aux antipodes de la réalité. Petite chasse aux idées fausses.

Qui ne s'est pas un jour alarmé de la consommation toujours croissante de papier, responsable de la disparition de nos arbres et de la pollution de notre environnement ? Et si c'était l'inverse ? Quelques faits montrent que nombre d'idées reçues n'ont aucun fondement et "polluent" notre réflexion. Jugez plutôt.

La forêt française grandit chaque année malgré les prélèvements imputés aux papetiers. Elle occupe aujourd'hui plus du quart du territoire (deux fois plus qu'à la Révolution). Quant au bois consommé par les papetiers, il ne représente que 10 % de la production annuelle naturelle de nos forêts. Il provient essentiellement de deux sources : les déchets des scieries et les éclaircies pratiquées pour permettre aux arbres de s'épanouir. En France, on ne plante jamais d'arbre pour faire du papier mais pour en faire du bois d'œuvre. L'industrie papetière n'utilise que les déchets de cette filière.

Le papier fabriqué aujourd'hui en France (et en Europe), toutes sortes confondues, contient 50 % de papiers recyclés. Le papier est le matériau le mieux recyclé. De plus il est biodégradable. Son utilisation réduit celle de matériaux



> L'écorçage du bois



concurrents non biodégradables (plastique, verre) et protège donc notre environnement.

Le papier, comme le bois dont il est issu, est le résultat de la réaction de CO₂ avec l'eau. Une feuille de papier stocke le CO₂ responsable de l'effet de serre.

Oui, mais que dire de la pollution générée par les usines de pâte à papier ? Là encore la méconnaissance est grande. Une usine moderne de pâte à papier brute produit cette pâte à partir de bois sans consommation d'énergie extérieure ni de produits chimiques.

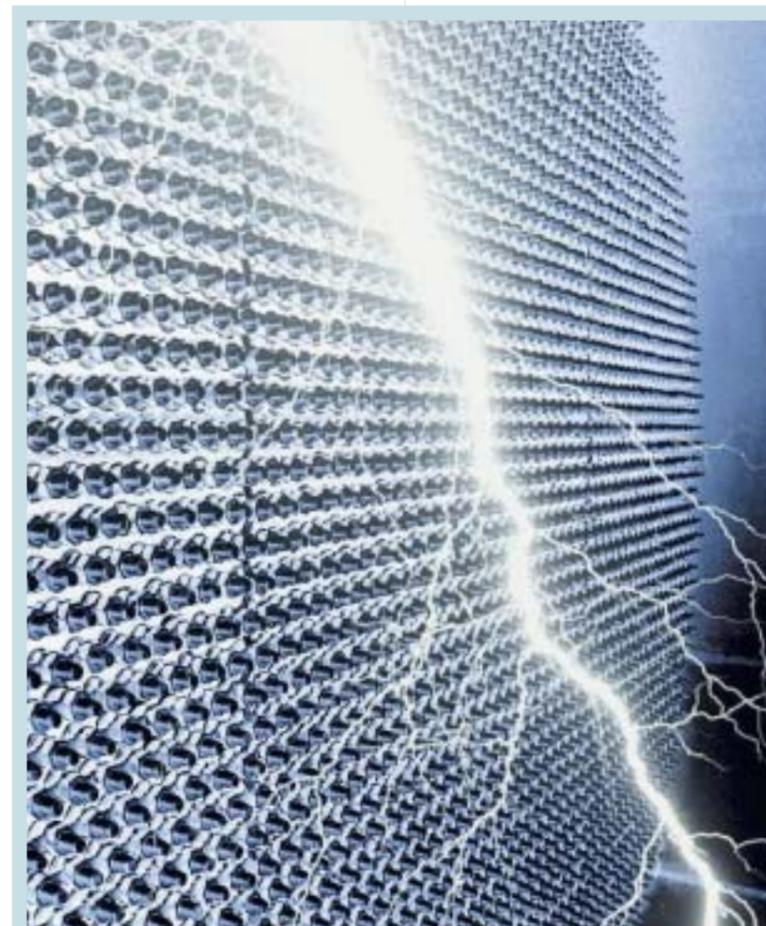
Certes, le blanchiment de cette pâte nécessite d'appliquer des réactifs chimiques. Des procédés actuellement mis au point utilisent des réactifs à base d'oxygène. Le gaz oxygène est déjà employé comme agent de blanchiment dans plus de la moitié des usines du monde.

Si un panorama aussi avantageux peut être dressé, c'est que cette industrie dynamique a su constamment innover pour relever les défis technologiques lui permettant de nous accompagner dans notre quête d'un développement durable. ●

Dominique Lachenal
Professeur INPG, directeur EFPG
dominique.lachenal@inpg.fr



> Le bois consommé par les papetiers ne représente que 10 % de la production annuelle naturelle des forêts.



> Décharge électrique permettant de générer l'ozone dans un ozoneur industriel

L'INP Grenoble à la pointe du blanchiment du papier

Fin des années soixante, André Robert, professeur à l'INP Grenoble, découvre, dans les laboratoires de l'EFPG, le moyen de blanchir les fibres cellulosiques par l'oxygène, en protégeant la cellulose lors de ce traitement. Comment ? En introduisant dans le milieu réactionnel des sels de magnésium. Partenaire du projet, Air Liquide s'engage dans le développement industriel du procédé. Le succès est tel qu'aujourd'hui le blanchiment à l'oxygène est appliqué dans plus de la moitié des usines du monde. Et Air Liquide est ainsi devenu le premier fournisseur de gaz industriels dans la plupart des pays du monde dont les États-Unis.

Trente ans plus tard, l'histoire se répète. Constitué des sociétés Air Liquide et Degremont, de l'EFPG ainsi que du CTP (Centre technique du papier), un consortium français entreprend de mettre au point puis de développer le blanchiment à l'ozone des fibres cellulosiques en complément de l'action de l'oxygène. Objectif : réaliser un blanchiment complet sans utiliser de réactifs chlorés.

Soutenu par le ministère de l'Industrie dans le cadre des Grands projets innovants, ce programme a permis de comprendre l'action de l'ozone sur les constituants des fibres et de maîtriser son effet. Plusieurs thèses ont été préparées sur le sujet dont l'une a reçu le prix de thèse de l'INP Grenoble. Un pilote a été construit, sur lequel sont venues travailler des équipes d'industriels et d'universitaires du monde entier. En quelques années, près de 30 chaînes de blanchiment à l'ozone ont été installées. Pour répondre aux énormes quantités d'ozone exigées par cette application (de 5 à 10 tonnes d'ozone pur par jour et par usine), il a fallu améliorer les performances des générateurs industriels d'ozone, dont les deux principaux fabricants sont français (Ozonon, filiale de Air Liquide, et Degremont).

Avec l'Allemand Wedeco, ils se partagent aujourd'hui plus de 90 % du marché.

EN BREF...

L'EFPG, premier centre de formation d'ingénieurs papetiers en Europe

Les industriels papetiers souhaitent former des cadres techniques de haut niveau capables de conduire une machine à papier et de concevoir de nouveaux papiers pour des besoins sans cesse grandissant. C'est ainsi qu'est née, voilà cent ans, l'École française de papeterie. École privée rattachée à l'INP Grenoble, sous tutelle du ministère de l'Éducation nationale, elle assure les deux tiers de son financement par des fonds privés, grâce à ses liens très forts avec le secteur industriel papetier et à celui de l'imprimerie. Contrôlé par la profession, l'accroissement du nombre d'étudiants, dont chacun est assuré de trouver un emploi, a suivi le développement de ce secteur industriel.

Avec soixante étudiants par année scolaire, l'EFPG est le premier centre de formation d'ingénieurs papetiers (et imprimeurs) en Europe, à égalité avec l'université technologique d'Helsinki.

Les ingénieurs EFPG sont omni-présents dans les sociétés papetières ou leurs fournisseurs : 25 % des cadres (toutes fonctions confondues) de l'industrie papetière française sont des anciens de l'école. Les étudiants sont d'abord attirés par les perspectives de carrières offertes : toutes promotions confondues, 25 % d'entre eux sont P-dg, directeur général, directeur d'usine ou de production, et très peu quittent ce secteur industriel. Salariés de grands groupes internationaux, 20 % partent à l'étranger.

Les liens tissés à l'école restent très solides. La grande majorité des ingénieurs EFPG adhèrent à l'Association des anciens, "La Cellulose", confrérie où l'on sent battre le cœur de tout un secteur industriel fier de son dynamisme et de sa réussite.

Dominique Lachenal,
professeur INPG, directeur EFPG

MICROTOMOGRAPHIE AUX RAYONS X : le papier sous toutes ses coutures

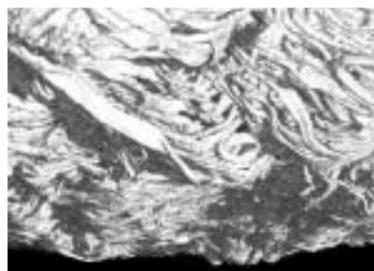
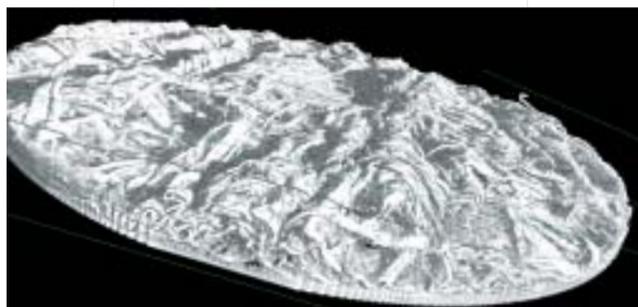
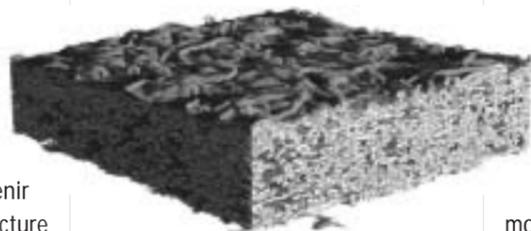
Avec la microtomographie aux rayons X, les papetiers peuvent caractériser très finement le papier, pour mieux répondre aux attentes des consommateurs et optimiser la fabrication.

Le papier est un exemple singulier de matériau qui couple propriétés de structure et propriétés d'usage. Autrement dit, les propriétés physiques que l'on souhaite obtenir dépendent directement de la structure fibreuse. D'où l'intérêt d'étudier finement cette dernière.

Notre projet vise à faire profiter l'industrie papetière de la microtomographie aux rayons X, une technique originale et novatrice, qui permet de mieux caractériser le matériau et d'en optimiser sa fabrication.

Le matériau papier se caractérise par sa structure à plusieurs échelles (fibres, structure fibreuse, taille de l'échantillon macroscopique industrielle). Ses propriétés d'usage dépendent non seulement de ses propriétés "dans la masse" mais également de celles de surface, par exemple la perméabilité et le brillant.

Accessible à l'ESRF (European synchrotron radiation facility), la micro-



> Exemples de structures tridimensionnelles de papier (résolution 2 microns)

tomographie aux rayons X permet de caractériser la structure. Les images obtenues sont analysées afin de déterminer les paramètres 3D primordiaux de structures et d'identifier les paramètres de modèles probabilistes, qui permettent de simuler les types de microstructures

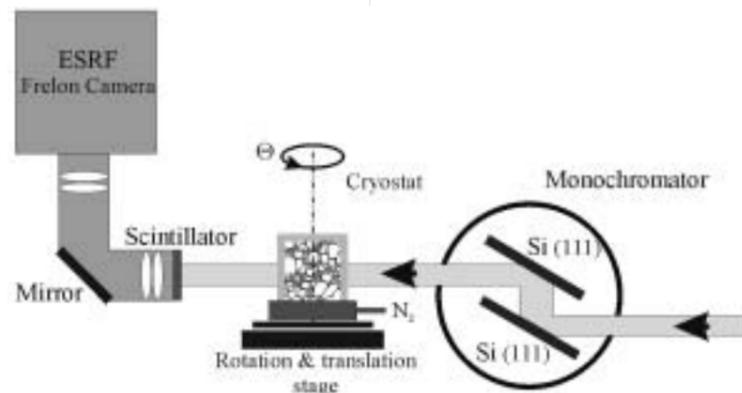
étudiées. Les paramètres structuraux déduits de ces analyses d'image sont ensuite pris en compte dans l'identification théorique (changement d'échelles) et numérique des propriétés physiques effectives (mécanique, thermique, optique...) du matériau

fibreuse. Les perspectives consistent à comparer les résultats des simulations numériques aux valeurs expérimentales obtenues, à partir d'échantillons issus soit de papiers industriels, soit de formettes de laboratoire.

Cette démarche intéresse particulièrement l'industrie papetière, qui, régulièrement, doit optimiser sa fabrication en ligne et contrôler des produits de plus en plus techniques. L'optimisation des opérations unitaires telles que le pressage permet d'envisager une réduction de coût de l'opération suivante (le séchage), grande consommatrice d'énergie.

De plus, on peut développer des matériaux à structure complexe (multi-couche) dont le développement a été entravé par le manque de technique d'analyse structurale non destructive.

Jean-François Bloch,
maître de conférences à l'EFPG
jean-francois.bloch@efpg.inpg.fr



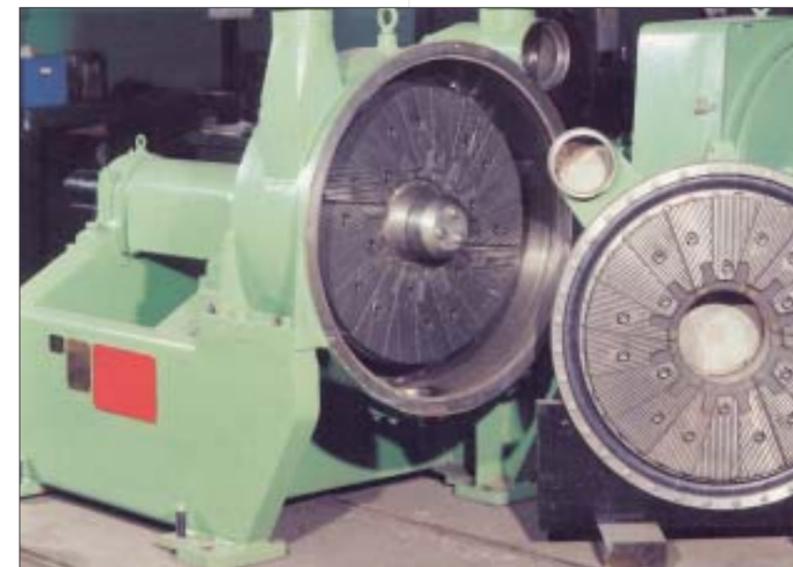
> Représentation schématique de la mesure d'une structure 3D à l'ESRF

LE RAFFINAGE À LA LOUPE

La théorie hydromécanique du raffinage permet de prévoir les effets du raffinage sur les fibres cellulosiques, donc de mieux maîtriser cette opération grande consommatrice d'énergie.

Des papiers aux propriétés mécaniques, optiques et "d'imprimabilité" toujours plus étendues : c'est l'opération de raffinage qui permet de diversifier les propriétés physiques du papier, pour répondre aux exigences croissantes des utilisateurs finaux.

Une fois mise en pâte, la matière première se présente sous la forme d'une suspension de fibres cellulosiques dispersées dans l'eau. Le raffinage produit des transformations morphologiques et physiques irréversibles à l'échelle de la fibre cellulographique, qui vont grandement contribuer à développer le potentiel de liaison des fibres lors de la formation de la feuille de papier. Les fibres sont hydratées, fibrillées (accroissement de leur surface spécifique) et raccourcies, pour devenir plus souples. Réalisées dans des appareils appelés raffineurs, ces transformations sont obtenues au prix de dépenses énergétiques considérables (entre 0,4 et 4,0 MJ/kg de matière sèche). Concrètement, la suspension fibreuse (d'une concentration de 20 à 60 kg/m³) est conduite dans l'entrefer d'une machine tournante. L'entrefer est l'espace – de quelques centaines de microns – existant entre les surfaces de lames en vis-à-vis, disposées sur des disques (ou



> En partenariat avec les aciéries de Bonpertuis dans l'Isère puis avec la Société belge Matech, une méthode a été développée pour définir des profils de disque de raffineurs industriels.

des cônes) en mouvement relatif. Pendant quelques millisecondes, les fibres y subissent à la fois une compression et un cisaillement.

Comment étudier cette opération complexe ? En partenariat avec les aciéries de Bonpertuis dans l'Isère puis avec la Société belge Matech, une méthode a été développée pour définir des profils de disque de raffineurs industriels. Une métrologie spécifique équipe un raffineur pilote, pour déterminer les forces

mécaniques axiales, hydrauliques, le coefficient de frottement global et l'entrefer en temps réel ; il devient alors possible de prévoir la cinétique de l'opération de raffinage et ses effets sur les fibres cellulographiques. C'est la théorie hydromécanique du raffinage qui contribue à mieux faire comprendre le fonctionnement de raffineurs et ainsi mieux prévoir les effets du raffinage.

Jean-Claude Roux, professeur INPG-EFPG
jean-claude.roux@efpg.inpg.fr

Allimand/LGP2 : un partenariat exemplaire

Deux prix + un brevet européen étendu à 160 pays.
La thèse réalisée au LGP2 en partenariat avec Allimand permet d'augmenter la productivité des installations papetières.

Les technologies utilisées dans l'industrie papetière sont le plus souvent optimisées pour des conditions de fonctionnement bien connues des industriels. Toute augmen-

tation de la productivité pose des problèmes techniques. En accroissant soit la vitesse, soit la largeur des machines à papier, certaines technologies classiques atteignent leurs limites.

Unique constructeur français de machines à papier, installée à Rives (Isère), la société Allimand a donc fait appel au LGP2 (Laboratoire de génie des procédés papetiers) pour concevoir de nou->

> velles technologies et repousser certaines limites.

Avant d'obtenir la feuille de papier que nous connaissons (matériau en bande d'épaisseur voisine de quelques centaines de micron), il est nécessaire de partir d'une suspension aqueuse de fibres cellulosiques (principalement) qui doit être convenablement homogénéisée, débarrassée de ses impuretés, traitée mécaniquement (raffinée) et enfin diluée. Toutes ces opérations se déroulent dans des circuits en amont de la machine à papier proprement dite.

Une fois la suspension préparée, elle est distribuée au moyen d'un injecteur hydraulique (muni d'une buse) sur toute la largeur de la machine. Le jet de suspension résultant est envoyé sur une toile perméable mobile, sans fin, montée sur une table de formation. La suspension déposée est ensuite égouttée, par filtration à travers la toile, donnant progressivement naissance à un matelas fibreux humide (embryon de la future

feuille de papier) qui sera ensuite pressé et séché.

La transformation géométrique d'une suspension fibreuse s'écoulant dans un tuyau en un jet plan continu et uniforme est réalisée par un injecteur hydraulique. Le jet de 15 à 25 mm d'épaisseur et de 5 à 10 m de largeur (correspondant à celle de la machine à papier) s'apparente à une nappe liquide où la concentration en solide est comprise entre 2 à 15 kg/m³.

Le travail de thèse (J.-D. Bonfanti, 1997) a porté précisément sur la définition d'un nouvel injecteur pour machines à papier (injecteur appelé "caisse de tête"). Sur les injecteurs classiques, il n'est pas possible de maîtriser, séparément, la masse surfacique (grammage du papier) déposée sur la toile de formation et l'orientation moyenne des fibres sur la largeur de la machine à papier. L'ouverture de la buse, au sortir du jet, permet de régler le grammage. Malheureusement, l'ouverture de la buse s'ac-

compagne également d'une perturbation de l'écoulement moyen et de l'orientation des fibres en conséquence. Les papiers ainsi fabriqués vont alors présenter des propriétés différentes suivant la largeur de la machine (défaut de non uniformité).

En liaison avec Allimand, nous avons étudié un nouvel injecteur dont le réglage du grammage du papier s'effectue par dilution locale en amont de l'injecteur, sans pour autant perturber l'écoulement moyen. Il en résulte une meilleure uniformité de la feuille sur la largeur de la machine à papier.

Cette thèse a reçu deux prix : celui de l'Innovation décerné par l'Association technique de l'industrie papetière (ATIP) en 1996, et le prix de thèse de l'INPG en 1998 dans la formation doctorale Génie des procédés. Elle a conduit à un brevet européen déposé par Allimand avec extension internationale dans 160 pays.

Jean-Claude Roux, professeur INPG-EFPG



Salle de contrôle d'une machine à papier

INDUSTRIE PAPETIÈRE MONDIALE : croissance prévue jusqu'en 2015

Le papier accompagne notre développement et rien n'indique qu'il en sera autrement dans les dix prochaines années.

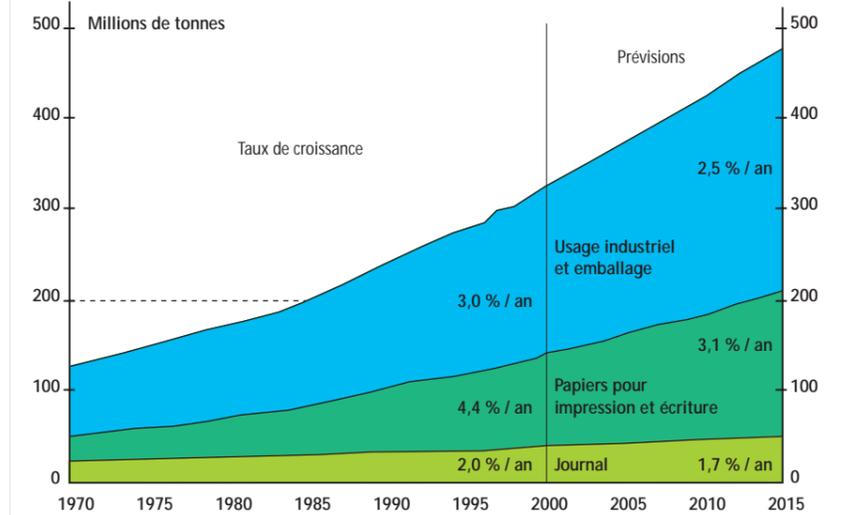
La consommation de papier par habitant dans les différents pays du globe est fortement corrélée avec leur PIB par habitant (voir schéma). Les plus fortes perspectives de croissance s'observent en Europe de l'Est, en Asie – notamment en Chine, aujourd'hui principal investisseur – et, dans une moindre mesure, en Amérique latine. Les autres parties du monde se contenteront d'une croissance plus faible, si bien qu'on estime que la demande de papiers cartons croîtra en moyenne de 2,2 % jusqu'en 2015 (à comparer au chiffre de 2,9 % pour la croissance économique), ce qui fera passer la consommation de 320 millions de tonnes aujourd'hui à plus de 450 millions de tonnes.

À remarquer : aucun signe évident n'est apparu qui pourrait augurer d'un remplacement du papier, même dans les pays leader en matières de technologies de l'information (Finlande, États-Unis). De même, aucun matériau ne menace aujourd'hui la position dominante du

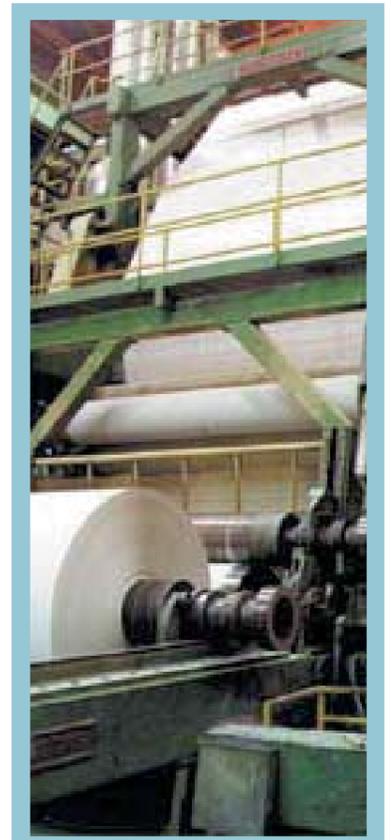
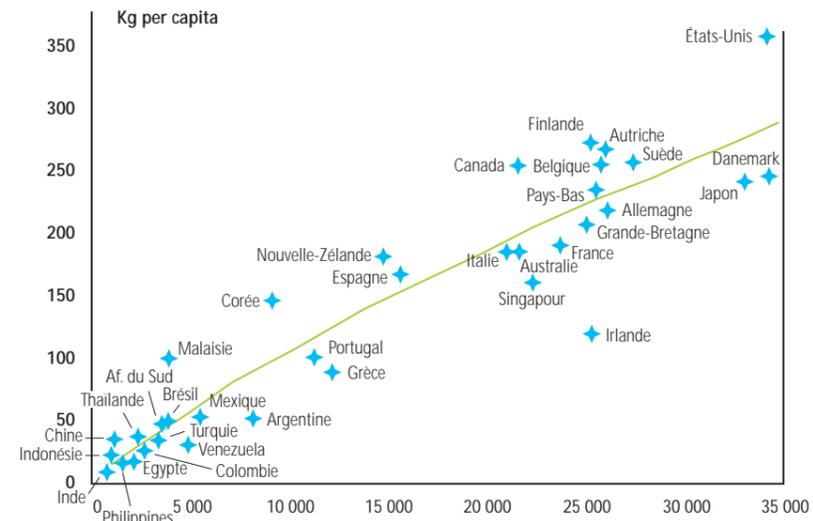
papier dans le secteur des emballages. Reste que le développement de la consommation sera surtout tiré par la demande émanant des trois quarts de l'humanité qui n'en consomment aujourd'hui pratiquement pas.

Dominique Lachenal, professeur INPG, directeur EFPG

Demande mondiale de papiers et cartons 1970-2015



Relation entre la consommation de papiers et cartons et la richesse d'un pays par capita (kg/\$)



Coucheuse à papier