

SAUVERGNE SCIENCES

BULLETIN DE L'ADASTA

N° 17 Janvier Février Mars 1991 20 F



**LES VERRES
CORRECTEURS
DE LA VISION**

LE VERRE : SA FABRICATION INDUSTRIELLE

ASSOCIATION POUR LE DEVELOPPEMENT DE L'ANIMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE EN AUVERGNE

Allocution prononcée le jeudi 7 mars 1991 par le nouveau Président de l'ADASTA à l'occasion du 5^e anniversaire de notre association

Madame et Monsieur les Représentants du Ministre de la Recherche et de la Technologie, Monsieur le Recteur Chancelier des Universités, Monsieur le Représentant du Conseil Régional, Monsieur le Représentant du Conseil Général, Monsieur le Représentant de la Municipalité, Monsieur le Président de l'Université Blaise-Pascal, Madame et Monsieur les Doyens et Présidents d'UFR, Mesdames, Messieurs, mes Chers Amis.

C'est avec fierté que je débute mes fonctions de Président de l'ADASTA mais également avec une certaine crainte car je mesure maintenant les lourdeurs de cette tâche. En effet, rien n'est plus périlleux que de participer à un poste de responsabilité, à la vie d'une association, fût-elle scientifique et ce n'est pas la lecture des journaux sportifs par exemple qui pourrait contredire cette affirmation.

Cependant, après mûre réflexion, j'ai accepté de poser une candidature que je n'avais ni sollicitée, ni voulue. Plusieurs facteurs m'ont paru déterminants :

— le premier facteur a été d'ordre affectif. L'ADASTA a bénéficié au départ d'une Equipe de pionniers parfaitement motivés et efficaces ; leur Président Roger VESSIERE a su donner son style ; j'ai pu apprécier sa compétence et sa sagesse au sein du Club des Ouvriers. Roland JOUANISSON s'est dépensé sans compter ; son dynamisme, sa fougue même m'ont rappelé à maintes reprises le jeune étudiant que j'ai connu à la Cité Universitaire quand nous arrivions frais émoulus de nos lycées dans l'aventure redoutable que représente l'entrée dans le monde universitaire. Ces deux personnalités et tous les autres membres du bureau m'ont persuadé : leur œuvre était légitime, importante et méritait d'être poursuivie.

— le deuxième facteur a été d'ordre personnel. Comme beaucoup d'Auvergnats et de Clermontois, je suis attaché à notre région. Parfaitement lucides, nous savons les difficultés spécifiques à celle-ci. Nous souhaitons tous essayer de changer le cours apparemment défavorable de notre histoire. De nombreuses initiatives sont prises à tous les niveaux : mise sur pied de programmes de recherche, développement de voies de transport, création de Clubs de Réflexion, etc... Pour ma part, à la demande de la Ville, puis de la Région, j'ai participé à des initiatives tendant à améliorer l'image de notre communauté provinciale. L'Universitaire que je suis pense que l'Université doit être le creuset de l'innovation et de la création, qu'elle doit nouer avec le monde des décideurs et le monde de l'Entreprise des liens étroits et dynamiques. Notre Région dispose d'atouts non négligeables par la qualité des Hommes et des Femmes qui l'habitent et qui l'aiment ; en particulier des hommes politiques d'envergure nationale occupent des postes de responsabilité importants et notre devoir est de les conseiller, de leur permettre de faire des choix réalistes et réfléchis. Des associations comme l'ADASTA, et bien d'autres également, doivent être des lieux de rencontre et de contacts entre les décideurs, les entrepreneurs et les concepteurs.

Il est évident que ces Associations volontaristes sont difficiles à gérer ; elles doivent compléter et dynamiser les structures légalement instaurées sans se substituer à elles. Elles doivent cependant être soutenues, valorisées par les décideurs, car elles sont un gage sinon un témoignage d'efficacité car émanant de personnes motivées, enthousiastes et parfaitement conscientes des évolutions technologiques, législatives que nous allons vivre.

De nombreux projets sont actuellement en gestation ; de nombreuses réalisations ont vu le jour et le rôle modeste que peut jouer le nouveau Président est de maintenir le cap déjà tracé, et de coordonner tout le potentiel de compétence et d'ambition qu'il devine autour de lui.

Je souhaite vivement me montrer digne de votre confiance et permettre un développement de l'ADASTA conforme à toutes vos espérances.

Pr. Pierre SOLÉ.

- **Le dossier :**
Le verre :
sa fabrication industrielle
par Michel Massaux 3
- **Conférence :**
Les verres correcteurs
de la vision
par Michel Henry 12
- **La recherche en Auvergne** 18
Le laboratoire de physique
des Milieux Condensés
de l'Université Blaise-Pascal
Deux médailles de bronze
du CNRS
- **Conférence-Visite** 21
Compte-rendu du voyage
à Heidelberg (R.F.A.)
les 17, 18, 19 octobre 1990
- **Informations régionales** 22 à 24
 - Les voies romaines et leur environnement
 - Un service d'information volcanologique par minitel (3615 code VOLTEL)
 - L'institut du vivant à la recherche d'un site en province
 - Un nouveau microscope à balayage au pôle technologique CASIMIR
 - Un serveur minitel ADASTA 24 h/24 73 40 76 58
 - Exposition au Musée Mandet
 - Opération «récréasciences»
 - Les petits débrouillards
 - «Les Confins de l'Univers»
 - Trois scientifiques clermontois à l'honneur.

L'ADASTA a reçu en 1990 le soutien financier

- de la Délégation à l'Information Scientifique et Technique (Ministère de la Recherche et de la Technologie)
- du Conseil Régional d'Auvergne
- de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (Ministère de la Culture et de la Communication)

Photographie de la couverture :
Photographie infra-rouge d'une cornée.
(document vidéopht).

Auvergne-Sciences : publication trimestrielle

Adhésions et Abonnements :

Adhésion à titre individuel	100 F
Adhésion à titre collectif	500 F
Membre bienfaiteur	1000 F (au moins)

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...).

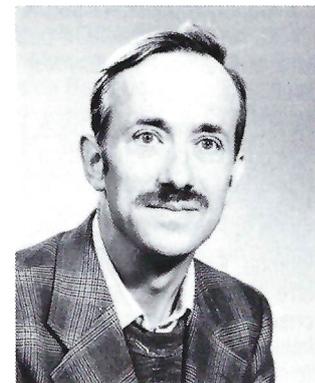
Adressez le courrier à ADASTA, UFR Sciences, 63177 Aubière Cedex - Tél. 73 40 72 26

Directeur de la Publication : Pierre SOLÉ
Rédacteur en chef : Roland JOUANISSON

Bulletin trimestriel - Abonnement : 100F par an
Edité par ADASTA Complexe des Cézeaux
63177 AUBIERE CEDEX - Tél. 73 40 72 26
Minitel : 73 40 76 58

LE VERRE : SA FABRICATION INDUSTRIELLE SES PROPRIETES OPTIQUES ET SES APPLICATIONS

par Michel Massaux*



Dans cet article, nous présentons la suite de l'étude sur le verre, commencée dans le n° 13 d'Auvergne-Sciences et poursuivie dans le n° 14. Il s'agit cette fois de décrire les techniques modernes de fabrication du verre, en insistant sur les activités auvergnates dans ce secteur industriel important. Nous mettrons en lumière certaines de ses applications, qui en font un matériau moderne et polyvalent.

INTRODUCTION

L'aperçu historique présenté dans le numéro 13 d'Auvergne-Sciences a résumé l'évolution de l'élaboration du verre au cours des âges, depuis le travail artisanal issu des découvertes faites dans l'Antiquité jusqu'aux productions des Manufactures du début de l'ère industrielle.

La forte viscosité du verre fondu permit tout d'abord le soufflage de grosses bulles qu'on s'efforça de transformer en plaques : les « ancêtres » de nos vitres furent obtenus en Normandie au XIV^e siècle.

Plusieurs méthodes ont été utilisées. On essaya d'abord de couper en tranches la bulle de verre sous forme de « pétales » qu'on cherchait à aplatir tant bien que mal ; puis on réussit à ouvrir la sphère en corolle, en la maintenant liée à la canne de soufflage ; en continuant à chauffer le verre, on imprimait à la canne un mouvement de rotation rapide sur elle-même. La force centrifuge agissant sur le verre pâteux permettait de réaliser des disques à peu près plans. Ces plaques de verre, comportant au centre une sorte d'ombilic révélant l'emplacement de la canne de soufflage, étaient d'épaisseur irrégulière. Elles servaient surtout à fermer les ouvertures des châteaux.

Au XVII^e siècle, ces « vitres » primitives furent remplacées par du verre coulé « sur table » étalé au rouleau comme une pâtisserie, puis poli à la main. C'est ainsi que furent fabriquées les glaces, très en vogue sous Louis XIV et Louis XV.

Parallèlement à cet effort technologique soutenu pour obtenir des plaques planes, l'élaboration du verre s'adaptait tout naturellement dès ses origines à la fabrication, par soufflage, de toutes sortes de récipients, utilitaires ou décoratifs. Toujours soufflés à la bouche, il furent progressivement réalisés dans des moules en creux, pour garantir la régularité des formes et la qualité de l'aspect.

Il reste de ce passé la distinction fondamentale, toujours en vigueur de nos jours, entre le verre **creux** (bonbonnes, bouteilles, flacons, gobelets, ampoules, vases...) et le verre **plat** (glaces, vitres, feuilles...). Les méthodes modernes de fabrication diffèrent complètement sur le plan technique ; la mécanisation, puis l'automatisation ont depuis longtemps remplacé l'intervention humaine, très pénible. De nos jours, une autre application industrielle du verre s'est largement développée : c'est l'utilisation de fibres de verre comme matériau efficace d'isolation thermique. Mais l'élaboration du constituant de base est la même, aux nuances de composition près : elle se fait dans des fours, appelés **FOURS VERRIERS**. Dans les grosses installations, un four peut produire plusieurs centaines de tonnes par jour.

A côté de ces fabrications de masse, le verre donne lieu à des productions, en faible quantité, de produits très élaborés, comme les verres d'optique destinés aux composants traditionnels : lentilles, prismes, ... ou les fibres de l'opto-électronique, ou encore les vitrocéramiques. Nous examinerons en détail les exigences de ces nouvelles technologies, après avoir d'abord décrit les fabrications industrielles.

LE FOUR VERRIER

Prenons comme exemple la fabrication d'un verre sodocalcique courant, produit industriel type. La composition pondérale est prise dans la gamme ci-dessous :

– Constituants **formateurs** :

SiO₂ : de 68 à 75 %

Al₂O₃ : de 0 à 3 %

– Constituants **modificateurs** :

Na₂O : de 12 à 16 %

K₂O : de 0 à 1 %

CaO : de 7 à 14 %

MgO : de 0 à 4 %

auxquels on adjoint des quantités infimes d'autres oxydes, colorants ou correcteurs de propriétés physiques telles que conductivité

électrique, absorption sélective de certains rayonnements, etc...

Examinons d'abord l'origine de ces matières premières.

La silice SiO₂ est fournie par du sable très pur (99,8 % SiO₂) généralement extrait dans la région de Fontainebleau. Ce massif gréseux formé à l'ère tertiaire a subi une décomposition progressive, son lessivage par les eaux météoriques a entraîné la séparation des constituants. La silice, en poudre fine, s'est accumulée dans certaines zones, d'où on peut l'extraire mécaniquement.

On peut également utiliser du quartz naturel broyé, sous-produit d'autres extractions minérales. Mais l'exigence de très grande pureté du matériau limite sérieusement les possibilités. Remarquons qu'il existe à Saint-Paul-la-Roche, en Dordogne, un gisement de quartz de pureté exceptionnelle, exploité industriellement pour ce genre d'utilisation (en particulier pour les verres d'optique).

L'alumine Al₂O₃, dont le rôle est d'accroître le désordre dans les enchaînements de tétraèdres (SiO₄)⁴⁻, est contenue avec de la silice dans le feldspath, aluminosilicate alcalin, autre constituant du granite. (On se sert également de ce minéral dans les productions céramiques). Il faut sélectionner sévèrement les provenances des feldspaths pour éviter l'introduction d'oxyde de fer, qui colore le verre. Dans certains cas, comme pour la fabrication de bouteilles, cette coloration n'est pas gênante ; mais pour le verre à vitres, sa présence est rigoureusement bannie.

Dans le cas où l'oxyde de fer est utile, d'autres minéraux alumineux sont utilisés : la phonolite, par exemple, est une roche volcanique basique contenant SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Fe₂O₃. On la trouve abondamment en Auvergne.

Les oxydes alcalins (Na₂O, K₂O) sont le plus souvent apportés sous forme de carbonates, dont l'intérêt sera mentionné plus loin ; mais on peut utiliser directement la soude et la potasse préparées industriellement.

* Michel MASSAUX, Maître de Conférences à l'Université Blaise-Pascal.

LE DOSSIER

Les oxydes alcalino-terreux (CaO, MgO...) peuvent être de provenance naturelle, sous forme de carbonates (CO₃Ca) : calcite ; CO₃(Ca, Mg) : dolomie. Leur pureté est alors soigneusement contrôlée. On peut aussi introduire directement les oxydes, comme pour les alcalins.

A ces constituants de base, on ajoute toujours du verre de récupération, broyé et réduit en poudre : on l'appelle GROISIL ou CALCIN. L'intérêt principal de son utilisation est d'abaisser la température de fusion du mélange. En contrepartie, la composition du verre obtenu sera affectée, car les éléments constitutifs du calcin se retrouveront intégralement dans le four. C'est donc dans l'industrie du verre d'emballage que cette procédure s'applique le mieux, sauf si le recyclage ne porte que sur un verre de composition unique. La récupération du verre est une exigence écologique, car c'est un matériau qui ne subit aucune dégradation naturelle. En outre, l'utilisation du calcin entraîne une économie d'énergie et de matières premières. Nous examinerons plus loin les problèmes que pose ce recyclage.

Dans l'étude des propriétés physiques du verre (n° 14 d'Auvergne-Sciences), nous avons vu que la silice pure fond à plus de 1700°C. Avec les éléments modificateurs alcalins, qui assouplissent la charpente siliceuse en coupant les ponts $\geq \text{Si} - \text{O} - \text{Si} \leq$, joints au calcin, verre déjà formé, le point de fusion est ramené aux alentours de 1200°C, selon la composition. Les ions Ca²⁺ ou Mg²⁺, introduits pour donner au verre une meilleure résistance mécanique et le rendre moins sensible à l'eau, font remonter le point de fusion d'environ 100°C. Il faut chercher un compromis entre les exigences techniques et économiques. Quant aux ions Al³⁺, qui, comme nous l'avons vu, ont pour but d'augmenter le désordre structural de la charpente siliceuse, ils n'ont pas une influence marquée sur le point de fusion du mélange.

Les constituants, de granulométrie définie, sont d'abord pesés par doses, puis mélangés intimement. On donne traditionnellement le nom de «COMPOSITION» au mélange ainsi obtenu. Ce mélange est homogénéisé, éventuellement humidifié, et pré-stocké en silos avant l'introduction dans le four.

La fabrication industrielle du verre s'effectue en continu : les matières premières sont convoyées jusqu'au four par un tapis roulant.

La production normale d'un four moderne est de l'ordre de 200 à 300 tonnes par jour ; dans ces conditions, la contenance du four doit être de plusieurs centaines de tonnes. On conçoit qu'il ne soit pas possible d'arrêter le fonctionnement d'un four sans le vider : la masse de verre solidifiée serait irrécupérable, entraînant la destruction totale du four.

La température à atteindre pour obtenir la fusion des constituants est d'au moins 1300°C ; l'affinage, dont nous parlerons plus loin, se

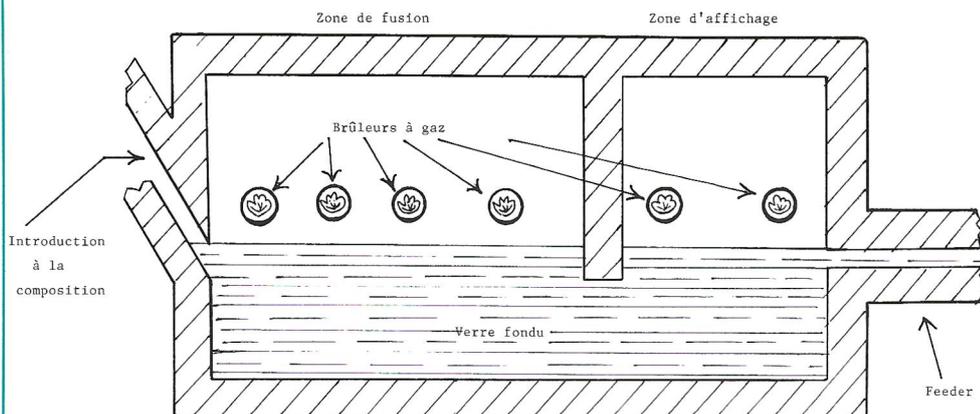


Figure 1.

Coupe longitudinale d'un four verrier. On reconnaît, à gauche de la zone de fusion, le sas d'introduction de la préparation (mélange des matières premières) ; à droite de la zone d'affinage, on trouve le canal de sortie du verre fondu, dénommé «feeder».

fait entre 1500 et 1600°C. La fusion s'effectue dans un four à bassin. C'est une vaste construction en briques réfractaires. Celles qui constituent le bassin sont à base de zircon, ZrO₂, dont la tenue à haute température est exceptionnelle. Elles sont peu à peu attaquées par le verre en fusion, et fortement dégradées par les impuretés métalliques accidentellement introduites dans le four. On appelle **campagne de four** la durée normale d'utilisation d'un bassin. Elle est estimée à environ 5 ans, et correspond à peu près à 5000T de verre produite par m² de sole.

Le chauffage des fours modernes est obtenu par des brûleurs à gaz ou à fuel lourd, disposés de part et d'autre du bassin. Ils sont plus nombreux dans le premier tiers du four, qui est la zone d'introduction des matières premières solides. L'air de combustion est réchauffé par passage dans un échangeur de chaleur ; c'est une construction constituée d'un empilement de briques réfractaires à forte capacité thermique formant un grand nombre de chambres en chicane. Ces briques sont portées à haute température par les gaz brûlés du four : on utilise toujours deux échangeurs, placés de part et d'autre du four et fonctionnant en alternance : l'un s'échauffe, en étant traversé par les gaz sortant du four à très haute température, pendant que l'autre cède de la chaleur à l'air admis aux brûleurs, portant sa température à 800°C.

Dans ces conditions, la température atteinte dans le four est d'environ 1500°C ; vers l'entrée, elle est de l'ordre de 1100°C. Un chauffage d'appoint est fourni par le passage d'un courant électrique dans la masse de verre fondu, à partir d'électrodes situées de part et d'autre du bassin.

Nous avons vu, en examinant les propriétés physiques du verre, que si sa conductivité électrique est minimale à l'état solide, elle devient appréciable si le matériau est fondu. C'est une conductivité ionique, qui provoque des transferts de matière et une homogénéisation de la composition du bain.

L'une des principales difficultés de l'élaboration du verre est justement l'obtention d'un mélange homogène des constituants. Un brassage mécanique, à cette température, est inapplicable. Le chauffage électrique qui vient d'être décrit favorise ce brassage ; mais le moyen le plus efficace est l'introduction de matières premières sous forme de carbonates dans la composition. C'est le cas pour les alcalins et les alcalino-terreux. A haute température, ces carbonates sont dissociés, et ils dégagent du gaz carbonique. Les bulles de ce gaz traversent la masse de verre fondu, ce qui provoque un brassage énergique du bain. On peut aussi procéder à l'injection de gaz neutres, azote ou argon, par des «bouillonneurs» placés au fond du bassin. Dans la cuve, l'apport énergétique des brûleurs et des électrodes est tel qu'il existe une zone chaude centrale, appelée barrière thermique, alors que les parois, la zone d'enfournement des matières premières et la zone de sortie du verre sont naturellement plus froides. Ces différences de température entraînent des différences de densité du bain : le verre plus chaud est plus léger. Il a donc tendance à monter, alors que le verre plus froid descend vers le fond de la cuve. Il en résulte des mouvements de matière dans la masse du verre fondu ; on les appelle **courants de convection**. Ils sont essentiels pour la qualité du verre et pour le bon fonctionnement du four. Ils concourent en particulier à parfaire l'homogénéité chimique du verre, et favorisent l'**affinage** (dégagement des gaz contenus dans la masse du verre en fusion). De plus le bassin comporte deux zones, séparées par une cloison réfractaire venant de la voûte (figure 1). Le verre fondu passe, par une sorte de siphon, de la première zone, où se fait la fusion proprement dite, à la deuxième, dite zone d'affinage, et où la température est plus élevée d'une centaine de degrés (1550°C). Cette opération de transfert naturel contribue largement au brassage du bain et à son dégazage.

La consommation d'énergie d'un four verrier est considérable, et c'est le poste le plus important dans le calcul du prix de revient du verre industriel. On estime actuellement que, pour fabriquer une tonne de verre courant, on dépense environ 100 kg d'équivalent-pétrole pour produire et livrer les matières premières, et 200 kg dans le four verrier et ses annexes.

Au cours des 15 dernières années, la rationalisation et l'optimisation des conditions de fonctionnement des fours a permis de gagner 25 % sur cette consommation. La modélisation et son traitement informatique ont largement contribué à ce progrès significatif.

FABRICATION DU VERRE CREUX

Elle s'applique à tous les produits verriers ayant une fonction de récipients : bouteilles, flacons de toutes sortes, bocaux, pots, gobelets, ampoules... La plus importante demande est celle de l'emballage des liquides (eaux minérales, eaux gazeuses, vins, bières, jus de fruits...). Les usines ont souvent été installées à proximité des lieux de production de ces liquides, mais ce n'est plus toujours vrai aujourd'hui.

Ainsi, la seule fabrique de verre creux installée en Auvergne se trouve à PUY-GUILLAUME, entre Thiers et Vichy. C'est l'usine Verdome, appartenant au groupe PERRIER.

Historiquement, l'usine a été créée en 1902, pour la production des bouteilles d'eau minérale du bassin de Vichy-Saint-Yorre. Propriété de la Compagnie fermière de Vichy jusqu'en 1952, elle subit alors le contre-coup de la grande réorganisation des sociétés d'exploitation des sources minérales en France. Elle passe alors sous le contrôle du groupe PERRIER, et diversifie ses productions à partir de 1960.

C'est actuellement le 3^e producteur français de verre creux, derrière Saint-Gobain et B.S.N. (Boussois - Souchon - Neuvesel). L'usine assure plus de 70 % du marché des bouteilles en verre pour eaux minérales. (On sait qu'une concurrence très vive fait rage entre le verre et les matières plastiques dans ce domaine).

Verdome, qui emploie sur le site de Puy-Guillaume 628 salariés, produit annuellement 600 millions de bouteilles (appelées « cols », en langage technique). Il y a 3 fours en service actuellement ; le tonnage annuel moyen est 185.000 T soit à peu près 60.000 T par four et par an, ce qui conduit à une production journalière de 165 T par four. Ce calcul simpliste montre à l'évidence l'importance des quantités de matières premières à livrer – par tous les temps – à l'usine pour assurer son fonctionnement normal. Certes, un stockage de réserves est possible, mais il ne peut raisonnablement excéder la consommation d'une quinzaine de jours. De même, l'évacuation des produits finis – qui, par leur fonction même, ont un volume maximal pour une masse donnée du verre – est une exigence absolue. Or la consommation de boissons fluctue, dans

l'année, au rythme des saisons ; des stockages sont faits sur les lieux de production.

En été, 15 wagons de 20 T sont expédiés à Vergèze, dans le Gard, où se trouve la source PERRIER, chaque jour.

Les matières premières reçues à Puy-Guillaume, en majorité par chemin de fer, représentant plus de 200.000 T. Un calcul simple permet en effet de justifier ce chiffre. Le verre fabriqué à Puy-Guillaume est un verre sodo-calcique qui nécessite, par tonne produite, l'introduction dans le four de 720 kg de sable, 260 kg de carbonate de sodium, 180 kg de carbonate de calcium et 30 kg de compléments (oxydes métalliques colorants, stabilisants, etc...). Le total est 1190 kg : la perte en masse observée provient des dégagements gazeux au cours de la fusion (un calcul rigoureux indique la masse de CO₂ : 187 kg).

Les matières premières utilisées annuellement sont donc théoriquement 133.000 T de sable, 48.000 T de carbonate de sodium, 33.500 T de carbonate de calcium et 5.500 T de compléments, soit au total 220.000 tonnes. Toutefois, le recyclage de 15.000 T de verre par an, sous forme de calcin, réduit légèrement ce chiffre.

Les bouteilles fabriquées à Puy-Guillaume sont destinées en priorité à l'eau PERRIER, mais la capacité de production de Verdome permet de fournir des verres d'emballage à d'autres producteurs, en particulier viticoles. Dans ce cas, les formes ou les décorations des bouteilles, les épaisseurs de leur paroi, les contenances, la couleur du verre utilisé sont caractéristiques de leur contenu : ainsi, les bouteilles de vin d'Alsace sont coniques et très allongées, les bouteilles de champagne plus ventrues et épaisses, les bouteilles de Bordeaux cylindriques et droites.

On distingue les bouteilles consignées, dont le ré-emploi impose une certaine robustesse, et les bouteilles « perdues », à parois plus minces, donc plus légères, sauf si le contenu est sous pression (bière, boissons gazeuses, champagne...). Les verres à bouteilles peuvent présenter divers coloris, dont les plus classiques sont dénommés « blanc », « mi-blanc », « ambre », « feuille morte », « champagne ». On les obtient en introduisant, parmi les matières premières, des oxydes métalliques en quantités convenables. La coloration du verre est d'origine **ionique**. C'est ainsi que la teinte « champagne » résulte de l'introduction, dans le verre, de 1,15 % d'oxyde de fer et 0,65 % d'oxyde de manganèse. La couleur verte obtenue est typique de celle de l'ion ferreux Fe²⁺. La couleur « feuille morte » est, en revanche, celle de l'ion Fe³⁺, qui donne, en solution, la couleur rouille bien connue. A ce propos, signalons qu'on peut incorporer dans la composition de petites quantités d'agent réducteur (carbone sous forme de coke) ou oxydant (un sulfate alcalin) pour modifier la teinte du verre si le besoin s'en fait sentir, comme par exemple lors d'un changement de fabrication. Les verres « blanc » ou « mi-blanc » sont utilisés pour certaines eaux minérales, les vins blancs

ou rosés, les huiles comestibles. C'est aussi le cas des litres consignés, qui comportent 6 étoiles sur le goulot. Le coloris « ambre » convient aux jus de fruits, ou à certaines bières. « Feuille morte » est une couleur qui convient bien aux apéritifs ou aux vins rouges, en particulier les vins de Bourgogne ; enfin, la teinte « champagne » est réservée à certains vins blancs : elle est verte, foncée, presque opaque sous forte épaisseur. Un coloris vert plus clair est utilisé pour les bouteilles d'eau PERRIER, ou pour des vins clairs, comme les vins d'Alsace, d'Anjou ou de Touraine. Un changement de teinte doit être effectué en continu, sans arrêter la production.

La procédure de fabrication d'une bouteille comporte différentes étapes. Un four alimente plusieurs chaînes de production, pouvant se différencier par la forme des flacons. Une grosse goutte de verre fondu, appelée « paraison » ou « gob », sortant du four vers 1100°C par un canal en matériau réfractaire (feeder), est coupée à la dimension convenable par une lame d'acier. Elle tombe alors dans un moule **ébaucheur**, qui va définir le contour du goulot et amorcer la formation du volume intérieur (perçage). Cette opération se fait soit par voie mécanique, soit par l'intervention d'air comprimé. Pendant ce temps, le verre a refroidi et a donc perdu de sa malléabilité. La bouteille ainsi ébauchée est alors transférée automatiquement dans un second moule dit **finisseur**. Après un réchauffage rapide, au gaz, on réalise un soufflage d'air comprimé à l'intérieur de l'ébauche, pour donner à la bouteille sa forme définitive, en particulier le contour du fond. Lorsqu'on n'utilise que des actions pneumatiques, la méthode de fabrication est appelée procédé SOUFFLE-SOUFFLE ; lorsque l'ébauche est obtenue par voie mécanique, c'est le procédé PRESSE-SOUFFLE. Le premier de ces procédés est décrit par le schéma synoptique ci-après :

On sait que le refroidissement rapide du verre entraîne des tensions mécaniques préjudiciables à la robustesse des pièces moulées. Ainsi les zones à forte courbure (fond, goulot des bouteilles) sont fragiles. Pour éviter ces inconvénients, on procède à un refroidissement progressif : c'est l'opération de RECUIT. Chaque bouteille passe, aussitôt après sa sortie du moule finisseur, dans un tunnel à température contrôlée, appelé « arche de recuisson ». C'est le dernier traitement thermique subi par la bouteille, sur laquelle seront pratiqués, en bout de chaîne, plusieurs contrôles : masse, dimension, capacité... Les défauts d'aspect sont mis en évidence par voie optique (examen visuel ou automatique). Tout écart aux normes entraîne la mise au rebut : la bouteille refusée repassera au four sous forme de calcin. Les produits finis sont alors emballés et stockés sur palette, avant leur livraison.

Le fonctionnement régulier d'un four pour verre creux nécessite des contrôles stricts en cours de fabrication, ainsi qu'une parfaite connaissance de la composition des

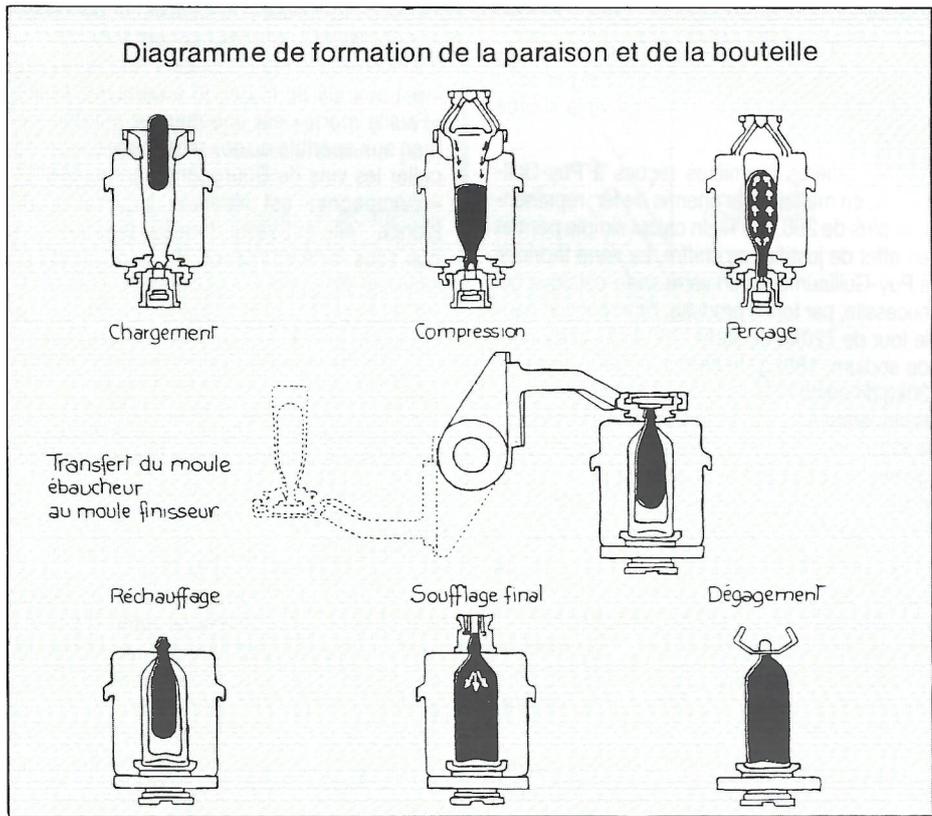


Figure 2. Les différentes étapes de la fabrication d'une bouteille par le procédé «soufflé-soufflé». Les flèches indiquent les contraintes pneumatiques.

matières premières. Chaque lot reçu subit une analyse quantitative systématique. On dose en particulier les éléments de base : Si, Al, Na, K, Ca, Mg, Fe ; on recherche aussi des éléments secondaires dont l'influence peut être grande sur la couleur, les propriétés physiques du verre : Ti, Mn, Co, Ni, Cr, P, As, Sb, S... Ces mêmes éléments sont également dosés dans des prélèvements de verre fondu, afin de corriger éventuellement la composition. Les analyses sont effectuées, le plus rapidement possible, par spectrométrie d'émission ou d'absorption, ou par fluorescence X. La mesure précise des températures dans le four est faite par des thermomètres à résistance, thermocouples ou par pyrométrie optique.

Insistons pour finir sur la position de Verdome dans la verrerie française. Celle-ci produit 6 milliards de bouteilles par an (sans compter les flacons destinés à la parfumerie ou aux produits pharmaceutiques), ce qui représente près de 2.500.000T qui sont produits annuellement en verre d'emballage. Cette industrie emploie 25.000 personnes (14.000 dans les bouteilleries), et exporte 25% de sa production. En 1989, le chiffre d'affaire global a été de 15,9 milliards de francs.

La verrerie de Puy-Guillaume, qui ne fabrique que des bouteilles, représente, avec 600 millions de cols, 10% de la production française ; elle assure plus de 70% du marché national des bouteilles de verre pour eau minérale. Le chiffre d'affaire a été de 463MF en 1988.

On a remarqué ces dernières années, une évolution favorable dans la demande de récipients en verre : pour des raisons écologiques, certains pays (en particulier scandinaves) recommandent l'utilisation du verre, que l'on recycle plus facilement que les matières plastiques : d'où un développement prévisible des besoins. Verdome a décidé voilà 2 ans un investissement de 200 MF pour accroître de 25% sa capacité de production, orientée surtout vers des bouteilles plus légères et de capacité supérieure (1,25 l). Un nouveau four, produisant 280 tonnes de verre brut par jour, est en cours d'installation. Sa conception a bénéficié d'une étude soignée, sur maquette, des courants de convection dans la masse de verre fondu. Il sera suivi de deux lignes de fabrication de bouteilles, par la méthode, déjà décrite, du verre PRESSE-SOUFFLE. L'électronique permet une automatisation quasi-totale de ces chaînes, d'où une productivité accrue, des économies d'énergie substantielles grâce à un chauffage mixte gaz-électricité et une optimisation de la qualité du produit.

La mise en service de cette installation, prévue pour 1991, entraînera la création de 52 emplois nouveaux dans l'entreprise, ce qui portera l'effectif à 680 salariés.

ANNEXE : LE RECYCLAGE DU VERRE
LES ASPECTS TECHNIQUES

Nous avons vu l'intérêt pratique de l'usage du calcin comme fondant lorsqu'on le mélange

aux matières premières dans un four verrier. En outre, il permet une économie de ces matières premières, et donc de l'énergie utilisée à les fabriquer. C'est en particulier le cas des carbonates alcalins, produits industriellement par des opérations coûteuses en énergie (l'économie correspondante atteindrait 33% pour un verre utilisant uniquement du calcin).

Contrairement à beaucoup de matériaux recyclés, le verre de réemploi ne subit aucune perte, ni qualitative, ni quantitative : 1 kg de calcin donne, à la refonte, 1 kg de verre à la sortie du four.

A ces avantages évidents, il convient d'opposer un inconvénient important : le matériau recyclé, s'il est mal trié, peut amener une pollution du verre produit. Souvent, les objets en verre comportent des parties en métal ou en matériaux divers : plastiques, céramique, etc... qui peuvent créer des défauts majeurs dans les objets réalisés à la suite du recyclage ; de plus, ces matériaux peuvent endommager gravement le four. C'est ainsi que le plomb ou l'étain, constituants majeurs de certaines capsules de surbouchage des bouteilles de vins fins, d'apéritifs ou de liqueurs, restent au fond du bassin, à cause de leur densité élevée, et attaquent les briques de zircone, ce qui peut provoquer une destruction prématurée du revêtement réfractaire du four. Par ailleurs, des impuretés, infusibles aux températures de fonctionnement du four, peuvent être entraînées dans le verre fondu et apparaître sous forme d'inclusions dans les bouteilles. C'est le cas d'éclats de céramique, de débris de vaisselle en porcelaine ou en faïence, de pierres, de particules d'émail, de copeaux métalliques, etc...

LES ASPECTS ECOLOGIQUES

Le grand public est maintenant tout-à-fait sensibilisé à l'utilité écologique du recyclage du verre. Ce matériau, dont la qualité est absolue pour l'emballage des liquides alimentaires, a l'inconvénient de ne pas s'auto-détruire, lorsqu'on le jette après usage. Il forme alors des débris coupants, qui présentent de nombreuses nuisances. Une campagne d'information très efficace, s'appuyant sur des objectifs humanitaires bien définis (aide à la lutte contre le cancer, actions sociales en faveur des handicapés ou des déshérités...) a permis de susciter un vaste mouvement de ramassage systématique des verres creux usagés. Par exemple, en 1989, on a collecté, sur le territoire national, 573.000T de verre ménager (principalement des bouteilles, des bocaux ou des flacons). Si on ajoute à ce chiffre, déjà considérable, les 190.000T de verre industriel (rebuts de verreries, en majorité), c'est 763.000T qui ont été recyclés par l'industrie verrière, entraînant du même coup de substantielles économies (c'est le 1/3 du tonnage maximal recyclable).

Le problème encore mal résolu est l'éducation du public pour rendre parfaitement efficace ce recyclage. Il est en effet capital de ne mettre dans les containers réservés à cet usage que du verre d'emballage, débarrassé

des capsules, bouchons, collerettes, etc... Il faut éviter rigoureusement les assemblages verre métal, comme ceux que l'on trouve dans les ampoules électriques, par exemple ; de même, les miroirs ou verres métallisés ; les verres émaillés ou décorés ; les associations de verre et de céramique ; les terres cuites, faïences ou porcelaines imitant le verre ; les bouteilles, bocaux ou flacons contenant des résidus de substances non identifiables, solidifiés à l'intérieur, etc... Ce tri, facile à la source, est beaucoup plus difficile et onéreux lorsque le verre a été collecté ; mais, de toute façon, l'opération est absolument nécessaire.

LES ASPECTS ECONOMIQUES

L'industrie de la récupération du verre occupe en France un peu plus de 450 personnes. L'économie réalisée par cette action représente annuellement à peu près 250.000T d'équivalent pétrole, soit la consommation énergétique d'une ville de 600.000 habitants.

La croissance prévisible de l'utilisation du verre non consigné (qui représente 20 % du total des contenants, contre 28 % aux bouteilles plastiques et 22 % aux récipients en carton plastifié, couramment employés pour le lait ou les jus de fruits) permet de prévoir que le tonnage total de verre recyclé dépassera 900.000 tonnes en 1990.

En constante progression, l'industrie du verre d'emballage est une activité que l'on peut citer en exemple comme une des industries les plus performantes et les plus modernes qui soient.

FABRICATION D'ISOLATEURS ELECTRIQUES

A la fabrication du verre **creux**, on peut associer celle du verre **moulé** telle qu'on la pratique pour réaliser des isolateurs électriques : la seule usine française spécialisée dans ce type de fabrication a son siège en Auvergne : il s'agit de l'usine SEDIVER, à Saint-Yorre, près de Vichy.

La production d'isolateurs en verre a débuté à Saint-Yorre vers 1930, dans une ancienne verrerie à bouteilles. A cette époque, les isolateurs étaient le plus souvent réalisés en porcelaine, car on reprochait au verre une trop grande fragilité. Vers 1950, l'usine applique, à titre expérimental, le procédé de trempé thermique du verre, qui lui confère d'excellentes caractéristiques mécaniques. Le succès fut rapide, car, dès 1957 Electricité de France décida de s'approvisionner exclusivement en isolateurs de verre trempé. Et, à partir de 1959, l'usine de St-Yorre se consacra exclusivement à ce type de fabrication. A l'origine, le verrier local s'était associé à la Société SAINT-GOBAIN pour mener à bien la mise au point du procédé. En 1967, une alliance fut également établie, en vue du développement de ce procédé, avec la firme anglaise PIL-KINGTON Brothers, inventeur de la méthode du verre flotté, décrite plus loin. Quelques an-

nées plus tard, ces deux associés décidèrent de cesser leur activité dans le domaine des isolateurs, et vendirent l'entreprise, dénommée CERAVÉR, à la Compagnie Générale d'Electricité (C.G.E.), l'une des plus importantes sociétés mondiales d'équipement électrique, de la production à la distribution. (Le nom CERAVÉR avait été choisi pour rappeler que la Société exploitait en même temps une usine de céramique industrielle près de Tarbes).

En janvier 1988, la C.G.E. a cédé le contrôle de CERAVÉR à la Société verrière italienne FIDENZA VETRARIA, filiale du Groupe P.A.F. (Partecipazioni finanziarie e industriali). Ce changement de structure a entraîné une modification de la raison sociale : l'entreprise est devenue la SOCIÉTÉ EUROPÉENNE D'ISOLATEURS EN VERRE ET COMPOSITE, SEDIVER. A côté des isolateurs de verre trempé, constamment améliorés et diversifiés, cette firme produit depuis une quinzaine d'années des isolateurs en matériau composite appelé ARMOURLITE : c'est une résine renforcée par des fibres de verre, et revêtue d'un élastomère de synthèse. Ces isolateurs sont surtout commercialisés, pour le moment, sur le marché nord-américain, tant pour des lignes de distribution moyenne tension (15 à 35 kV) que pour des lignes à haute tension jusqu'à 735 kV. De nouvelles applications de ces matériaux composites apparaissent pour le compactage des lignes (consoles isolantes). SEDIVER possède plusieurs filiales à l'étranger : au Brésil (Electrovidro, à Sao Gonçalo), aux Etats-Unis (Sediver Incorporated, à York en Caroline du Sud) et au Canada. Des licences ont par ailleurs été vendues en Grande-Bretagne, en Norvège, en Argentine, en Australie...

En 1988, le chiffre d'affaires de SEDIVER a été de 492MF. Dans ce chiffre, le verre trempé représente à peu près 90 %, contre 10 % à l'ARMOURLITE. L'exportation porte sur environ 60 % de la production.

Le nombre d'employés est actuellement 485. Il a tendance à diminuer par l'effet de l'automatisation poussée de la production. Mais la progression des services de Recherche peut compenser cette évolution.

SPECIFICITES LIEES AUX EXIGENCES TECHNOLOGIQUES

Elles se situent sur deux plans :

- la composition et la qualité du verre utilisé ;
- la méthode de fabrication des isolateurs.

A) COMPOSITION ET QUALITE DU VERRE

Il faut utiliser un verre présentant une conductivité électrique aussi faible que possible, une grande rigidité diélectrique (c'est le champ électrique maximal que peut supporter le matériau sans subir de dégradation irréversible), des propriétés mécaniques exceptionnelles, et une grande stabilité physico-chimique.

Nous avons vu que la conductivité électrique d'un verre est toujours très faible à la température ambiante. Pour la silice pure,

transparente, par exemple le quartz, fondu au four électrique, on trouve $\gamma = 10^{-16}$ S.m⁻¹. Lorsqu'on utilise comme matière première du sable, comme celui de FONTAINEBLEAU (pureté : 99,8 % SiO₂), on remarque que γ augmente sensiblement : $3,2 \times 10^{-13}$ S.m⁻¹. Cette valeur est très proche de celle d'un verre sodocalcique ordinaire. Ce sont les ions Na⁺ qui sont les principaux responsables de la conductivité de ce verre : ils y contribuent à la fois par une conduction **volumique** (migration à travers la charpente siliceuse, facilitée par leur petite taille) et par une conduction **superficielle** favorisée par la gaine d'humidité que ces ions maintiennent par adsorption.

La silice pure serait beaucoup trop coûteuse pour fabriquer des isolateurs électriques (matière première onéreuse, mise en œuvre à haute température). On a retenu un verre d'oxydes à plus bas point de fusion. Il n'est pas possible d'éliminer complètement les éléments alcalins, car le verre serait trop difficile à travailler. Mais la composition est appauvrie en sodium, enrichie par du potassium. Elle comporte de l'oxyde de calcium CaO, de baryum BaO, de l'alumine Al₂O₃, et un peu d'oxyde de fer Fe₂O₃.

Pour la rigidité diélectrique, la silice pure transparente sert encore de référence ; dans les meilleures conditions, 1 cm d'épaisseur supporte une différence de potentiel de 400kV, ce qui correspond à un champ électrique maximal de 4×10^7 V.m⁻¹. Les impuretés contenues dans la silice opaque divisent cette valeur par 2, et ce résultat est pratiquement le même pour le verre sodocalcique ordinaire.

En résumé, pour les propriétés électriques, le verre appauvri en ions sodium, mais comportant du potassium, du calcium et du baryum possède des performances satisfaisantes pour un prix de revient optimal.

Examinons maintenant les caractéristiques mécaniques. Il faut d'abord insister sur le fait que les résultats observés dépendent fortement des procédés de fabrication, qui font l'objet du paragraphe suivant. Mais il existe des lois générales, parfois empiriques, que nous pouvons résumer comme suit :

- **Le module d'YOUNG E** (coefficient d'élasticité) d'un verre d'oxydes à charpente siliceuse est une fonction linéaire des pourcentages en masse des oxydes constituants. Chacun des oxydes intervient avec un coefficient spécifique, qui vaut, en mégapascal : SiO₂ : 400 ; Al₂O₃ ou Fe₂O₃ : 1200 ; Na₂O, K₂O : 1100 ; MgO : 3000 ; CaO : 2400 ; BaO : 2200...

Donnons un exemple d'application. Considérons un verre à bouteilles de composition pondérale définie par : SiO₂ : 70 %, Al₂O₃ : 3 % ; Fe₂O₃ : 2 % ; Na₂O : 10 % ; CaO : 10 % ; MgO : 5 %.

Son module d'Young calculé est :

$$E = 70 \times 400 + (3+2) \times 1200 + 10 \times 1100 + 10 \times 2400 + 5 \times 3000 = 84000 \text{ MPa}$$

soit 84 GPa.

LE DOSSIER

On remarquera l'intérêt du remplacement des oxydes alcalins par des oxydes alcalino-terreux, en particulier la magnésie MgO. De même, le remplacement de SiO₂ par Al₂O₃ ou Fe₂O₃ est bénéfique pour cette caractéristique mécanique.

– La dureté d'un verre peut être exprimée de différentes manières. Si l'on prend en compte la dureté à la rayure, déterminée au moyen d'un scléromètre, on remarque

- une diminution lorsque le pourcentage pondéral en oxydes alcalins (Na₂O, K₂O) augmente ;
- une augmentation lorsque le pourcentage pondéral d'oxydes alcalino-terreux ou apparentés (MgO, CaO, ZnO) augmente ;
- une augmentation avec l'introduction de B₂O₃ jusqu'à un taux pondéral de 10 % ; au delà de cette valeur, la dureté n'évolue pratiquement plus.

Là encore, les oxydes alcalino-terreux présentent un avantage significatif.

L'expérience montre que l'état de surface d'un verre influence beaucoup plus son comportement mécanique que sa composition. Or l'état de surface dépend essentiellement de la méthode de fabrication des pièces étudiées. Une précaution élémentaire est d'éviter toute discontinuité provoquée par un manque d'homogénéité. D'où des exigences sur la méthode d'élaboration du verre : il faut impérativement éviter les impuretés introduisant des inclusions. Par exemple, les briques réfractaires du four doivent être remplacées avant qu'elles se désagrègent ; les matières premières sont rigoureusement sélectionnées ; le calcin provient exclusivement des rebuts de fabrication de l'usine.

De même, l'affinage du verre doit être particulièrement soigné, par brassage prolongé du bain fondu, grâce aux techniques déjà citées dans l'étude du four verrier.

Un dernier aspect des exigences techniques sur la nature du verre destiné aux isolateurs est la tenue de ce matériau face à l'agressivité des agents atmosphériques. Comme tous les matériaux à base de silice, le verre est sensible à certains agents chimiques en particulier l'acide fluorhydrique (HF) en solution, et les composés alcalins ou, à un moindre degré, alcalino-terreux, en présence d'humidité. Le verre sodocalcique ordinaire est légèrement dissous par les solutions de soude NaOH, ou de potasse, KOH. L'eau elle-même n'est pas sans effet sur le verre ; elle libère les ions alcalins, ce qui peut provoquer une altération superficielle. Les alternances de condensation et d'évaporation, que l'on rencontre régulièrement dans les pays tropicaux, sont particulièrement dommageables : le lessivage de la surface forme, dans les pores, des solutions alcalines avec les ions extraits. Cette attaque superficielle se traduit par l'apparition d'un voile diffusant la lumière. Puis, la surface devient rugueuse, grenue. Il se forme alors des dépôts blanchâtres de carbonates (cal-

cium, magnésium...) sous l'effet du gaz carbonique de l'air. Les propriétés mécaniques et électriques sont détériorées, et le phénomène peut précipiter la déchéance des isolateurs. Pour éviter ces inconvénients, il faut rendre le verre moins vulnérable aux agents chimiques cités, par diminution des proportions d'oxydes alcalins au profit de l'alumine, ou par traitement de surface approprié (voir ci-dessous).

A Saint-Yorre, la fabrication du verre – d'une seule composition – est assurée par deux fours. L'un, contenant 80 tonnes, est de conception classique, avec un chauffage mixte gaz-fuel lourd, et un appoint électrique au niveau de l'affinage. L'autre, d'installation récente, a un chauffage principal électrique ; il est de plus petite capacité (20 tonnes).

B) METHODE DE FABRICATION

Les isolateurs en verre ont des formes commandées par des exigences électriques et mécaniques. Ce sont le plus souvent des sortes de cloches, suspendues en chaînes plus ou moins longues lorsqu'on les utilise sur des lignes à haute tension (figure 3). Ces formes sont étudiées pour allonger au maximum le trajet de contournement d'un arc éventuel ; les isolateurs placés en atmosphères fortement polluées ont des profils spéciaux. Des pièces métalliques sont ensuite fixées aux cloches diélectriques pour permettre l'accrochage et le verrouillage de l'isolateur à un support et le maintien du conducteur isolé (ligne électrique).

Les cloches diélectriques en verre ne peuvent être réalisées en série que par moulage mécanique. C'est alors que réapparaissent les contraintes liées aux exigences d'utilisation. Nous avons déjà signalé l'importance de la qualité de l'état de surface pour garantir les performances mécaniques. Pour un objet en verre de composition donnée, les blessures que peut subir sa «peau» au cours de la fabrication ou des manipulations ultérieures doivent être soigneusement évitées. (A titre de preuve, rappelons-nous que la découpe du verre plat au diamant se fait à partir d'une rayure très peu profonde de la surface). Par exemple, les très fines craquelures, presque invisibles à l'œil nu, qui se forment à la surface d'un verre moulé, lorsque le métal du moule est trop froid, sont très préjudiciables à sa résistance mécanique et thermique.

La première exigence dans les conditions de fabrication est donc une optimisation attentive des échanges thermiques au moment du moulage, jointe à une qualité parfaite de l'état de surface du moule utilisé.

Mais la solution pratique à l'amélioration de la résistance mécanique se trouve dans la TREMPE des cloches en verre. Aussitôt après leur moulage, à 700°C environ, elles sont soumises à des jets d'air soigneusement dosés, pour obtenir un refroidissement contrôlé de la surface, en fonction du profil de la pièce. Le résultat de ce traitement est que le verre rapidement solidifié possède une structure proche de celle qu'il a à haute température, en

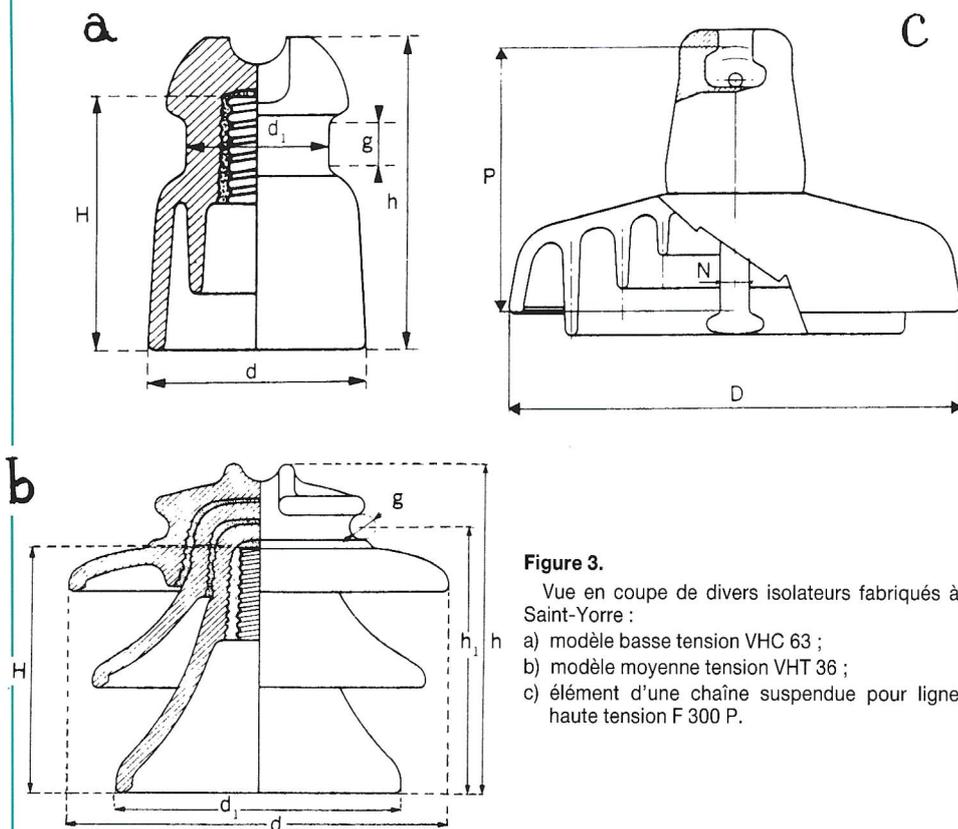


Figure 3.

Vue en coupe de divers isolateurs fabriqués à Saint-Yorre :

- a) modèle basse tension VHC 63 ;
- b) modèle moyenne tension VHT 36 ;
- c) élément d'une chaîne suspendue pour ligne haute tension F 300 P.

particulier une masse volumique plus faible que celle des zones ayant subi un refroidissement plus lent. On conçoit que se trouvent accolées des couches de masses volumiques différentes ce qui a pour effet d'engendrer un système complexe de tensions internes **permanentes**. Les couches superficielles, de volume massique supérieur, sont en compression : elles enserrant les couches profondes, en extension.

Ces tensions internes sont l'équivalent d'une pré-contrainte venant de l'extérieur. On peut les mettre en évidence grâce à la biréfringence qu'elles provoquent dans le verre, normalement isotrope. En examinant la lumière blanche transmise par une pièce de verre trempé, placée entre un polariseur et un analyseur croisés, on observe des colorations qui révèlent des zones de différence de marche donnée entre les rayons possédant des vitesses de propagation inégales ; pour une épaisseur traversée constante, elles correspondent à une biréfringence uniforme ; en supposant cette biréfringence proportionnelle à la contrainte interne, on peut tracer une cartographie approchée de ces contraintes dans le matériau.

La trempe, qui met la «peau» des pièces traitées en compression, minimise l'effet des micro-fissures qui peuvent s'être formées, malgré les précautions prises au moulage. On estime que la résistance au choc est à peu près multipliée par 7, tandis que la résistance à la flexion est 5 fois celle du même matériau recuit. Un avantage indirect est que le verre trempé se fragmente en milliers de morceaux dès lors qu'une pièce présente un défaut initial majeur (fissure importante, inclusion ou bulle accidentelle, etc...).

Si l'on compare les performances des isolateurs en verre trempé à celles d'isolateurs de forme identique en porcelaine, on constate que, même si l'émail déposé sur celle-ci crée également une contrainte superficielle, la force de compression engendrée n'est que le $\frac{1}{7}$ de celle du verre trempé, ce qui limite beaucoup son efficacité sur la prévention des risques de fissuration. Remarquons aussi que la porcelaine contient toujours beaucoup plus (dans un rapport 10^4 ou 10^5) de défauts (impuretés, inclusions, cavités internes,...) que le verre, par suite du processus de fabrication par voie humide. De plus, tout défaut macroscopique du verre est visible, et les pièces défectueuses peuvent être immédiatement éliminées. Cet ensemble d'avantages a joué un rôle déterminant dans la promotion du verre trempé comme isolant électrique : sa supériorité est maintenant reconnue dans le monde entier. Seul, un fabricant japonais produit des isolateurs en porcelaine de performances acceptables.

SEDIVER pratique toutes sortes d'essais en laboratoire pour améliorer les performances des isolateurs. Ils ont pour but de tester les caractéristiques des matériaux, ajuster leur composition, vérifier leur comportement sous l'effet de contraintes extérieures. Ainsi, on

soumet les isolateurs à des essais de vieillissement accéléré. Les chaînes d'isolateurs haute tension sont testées sous des tensions électriques très élevées, beaucoup plus importantes que celles qu'ils doivent normalement supporter, dans des atmosphères humides ou polluées. Des surtensions équivalant à des coups de foudre sont pratiquées et leurs effets analysés en temps réel. Il est en effet essentiel de connaître le comportement des isolateurs aux ondes de choc à front raide (2,5 à 10 Mégavolts par micro-seconde), de déterminer les niveaux de perturbation en hyperfréquences pour choisir les meilleures configurations dans des conditions données. Enfin, des essais mécaniques (torsion, flexion, vibration, etc...) sont systématiquement effectués sur les chaînes d'isolateurs pour tester leurs performances en situations extrêmes (surcharges dûes au givre, au vent, etc...).

L'avenir offre deux orientations déjà amorcées :

- le développement d'isolateurs en matériau composite de type ARMOURLITE, plus légers ;

- l'amélioration des isolateurs en verre trempé. Dans ce but, on peut envisager de combattre encore plus efficacement les microfissures superficielles, principale cause de fragilité du verre, par des méthodes physico-chimiques élaborées. Seuls, des impératifs économiques freinent ce développement.

- d'une part, on peut réaliser des échanges d'ions dans la couche superficielle des pièces moulées. On doit substituer les ions de petite taille (Na^+ , Mg^{2+}) par des ions plus volumineux (Ba^{2+} , Pb^{2+} ...). On obtient, lors de la trempe chimique, des contraintes de compression en surface plus importantes.

- d'autre part, chercher à créer une dévitrification contrôlée de la surface. En appliquant à des verres de composition spéciale un traitement thermique approprié, on peut provoquer à la surface des pièces la formation d'une phase cristalline répartie au sein du verre. Le coefficient de dilatation d'un tel matériau, de type vitrocéramique, est alors pratiquement nul, ses propriétés mécaniques et électriques sont exceptionnelles. La formation de cette structure mixte, constituée de micro-cristaux dispersés dans une matrice vitreuse, est limitée à la surface de l'isolateur qu'il n'est plus nécessaire de tremper.

Ces solutions d'avenir ont toutes les deux l'inconvénient d'augmenter sensiblement le coût de fabrication. Actuellement, on préfère privilégier un contrôle systématique des produits. Ce contrôle comporte d'abord le chauffage de chaque pièce à 150°C , puis son trempage dans l'eau froide. Ce choc thermique garantit la qualité des isolateurs, qui sont vérifiés optiquement. Des contrôles dimensionnels sévères sont pratiqués de façon statistique ; on teste de la même manière les caractéristiques électriques des isolateurs sortant des chaînes d'assemblage.

En conclusion, insistons sur l'importance économique, mais aussi technologique et scientifique, de la firme SEDIVER pour notre région. Sa production jouit d'une renommée internationale, et les isolateurs fabriqués à Saint-Yorre équipent les réseaux électriques de plus de 110 pays du monde. Solidement implantée en Auvergne, la Société souhaite y regrouper ses activités, en développant en particulier ses structures de recherche.

FABRICATION DU VERRE PLAT

Il existe de nos jours différentes techniques utilisées en fonction du produit : vitre ou glace. Une vitre est une lame à faces parallèles, mince, obtenue directement, tandis qu'une glace subit en plus le polissage de ses deux faces.

Dans notre région, aucune usine ne se consacre à ce type de fabrication : elles sont regroupées dans le Nord ou l'Est de la France.

Le verre à vitres ordinaire est obtenu par étirage, sous l'effet de la pesanteur, du verre fondu, sortant du four à l'état pâteux (vers 1200°C). Un guide évidé permet de travailler une section constante de matériau, ce qui donne une épaisseur uniforme à la vitre obtenue.

Cette procédure traditionnelle est progressivement supplantée par une technique originale, mise au point par la firme anglaise PILKINGTON Brothers, le procédé «FLOAT», ou verre flotté.

À la sortie du four à bassin, on réalise l'étalement de la nappe de verre sur un bain de métal fondu. Ce métal doit être dense ; son point de fusion doit être inférieur à la température de travail du verre ; enfin, il ne doit pas réagir avec celui-ci, ni s'oxyder à l'air. C'est l'étain qui convient le mieux.

Si on laisse le verre (de composition standard) s'étaler librement sur le métal fondu, on obtient une feuille de 6 mm environ d'épaisseur. Pour augmenter celle-ci, il faut limiter l'étalement par des pièces métalliques de bordure de la nappe ; pour une épaisseur inférieure, on doit après étalement naturel, étirer la feuille en exerçant une traction latérale sur la couche de verre.

La plus grosse difficulté technique est le contrôle très précis de la température, et le maintien rigoureux de la propreté du bain métallique fondu. L'oxydation est éliminée en travaillant en atmosphère réductrice.

Le verre obtenu a un état de surface très satisfaisant : aucun polissage n'est nécessaire, ce qui diminue fortement le coût de revient du produit.

La glace est produite par laminage continu. Le verre fondu, amené à 1200°C dans un «avant-corps» à la sortie du four, passe sur une «lèvre de coulée», sorte de déversoir parfaitement horizontal qui laisse s'écouler le trop-plein du four, d'épaisseur rigoureusement contrôlée.

La couche de verre pâteux est alors laminée entre deux rouleaux d'acier, énergiquement refroidis par de l'eau courante pour éviter que le verre adhère au métal. La température du rouleau au contact du verre atteint 900°C. Il faut tenir compte des déformations thermiques, non négligeables à cette température, pour donner un profil convenable aux cylindres de cette sorte de laminoir verrier.

La feuille de verre passe ensuite sur des rouleaux transporteurs, où elle refroidit, avant d'être polie, puis découpée en fonction des applications (miroiterie, pare-brise, vitrines...).

Le polissage est réalisé en continu, sur les deux faces de la feuille en même temps (procédé appelé « TWIN doux »).

Les polissoirs sont des disques en alliage léger recouvert de feutre, tournant à 500 tours par minute, et oscillants pour décrire uniformément toute la surface. L'abrasif est du rouge d'Angleterre, « potée » d'oxyde de fer en suspension dans l'eau. La granulométrie est choisie en fonction du but recherché, mais plusieurs étapes sont toujours nécessaires.

Après découpage et contrôle des glaces, d'autres opérations sont pratiquées, parmi lesquelles la TREMPE, dont nous avons vu l'intérêt pour augmenter fortement la résistance mécanique du verre. On l'utilise en particulier pour les glaces destinées à l'industrie automobile, ou au bâtiment.

FABRICATION DES FIBRES DE VERRE

Il existe trois grandes familles de fibres de verre :

- Les fibres **courtes** destinées principalement aux matériaux d'isolation, utilisés en grandes quantités dans le bâtiment, mais aussi dans la fabrication d'appareils électroménagers ou dans l'industrie automobile ;

- Les fibres **longues**, dont la plus importante application est l'élaboration de matériaux composites : croisés pour former une sorte de tissu, elles sont associées à des résines ou des matières plastiques, qu'elles renforcent considérablement.

- Les fibres **optiques**, guides de lumière souples, qui permettent de transporter un flux lumineux d'un point à un autre avec le minimum de pertes. Ces composants optiques, de création récente, sont de plus en plus utilisés en télé-communications, en opto-électronique ou en biologie. Les exigences très particulières sur la pureté du matériau vitreux utilisé et sur les caractéristiques physiques ou géométriques de ces fibres font que leur fabrication s'apparente plus à une opération de laboratoire qu'à une technique industrielle classique : nous l'étudierons à part.

ELABORATION DES FIBRES COURTES

Elles sont fabriquées par **étrirage centrifuge**. Un filet de verre fondu, de viscosité aussi faible que possible, tombe sur la péri-

phérie d'un disque ou d'un cylindre d'acier tournant à grande vitesse (4000 tours par minute). Les gouttelettes formées sont projetées radialement dans un courant d'air qui les refroidit sous forme d'une fibre de quelques centimètres de long.

On conçoit que le diamètre et la longueur des fibres soient étroitement liés à la viscosité et à la densité du verre, à la quantité traitée par unité de temps, à la vitesse de rotation du disque récepteur et au gradient thermique du refroidissement. Les fibres obtenues sont irrégulières, mais le procédé est simple et économique.

ISOVER Saint-Gobain, premier fabricant français de fibres de verre pour l'isolation, a mis au point une variante de ce procédé, qui permet une meilleure reproductibilité des fibres.

Le verre fondu tombe dans une coupe hémisphérique en matériau réfractaire. La paroi de cette coupe est percée de trous calibrés ; elle tourne à grande vitesse. Les filets de verre qui s'en échappent sont soumis à un jet de gaz chaud radial. Les fibres, formées par l'action centrifuge, sont encore étirées par l'action de ce jet. Leur section est réglable, par action sur la vitesse du jet de gaz et sa température. Dans les conditions standard d'utilisation, le diamètre des fibres obtenues est compris entre 1 et 20 μm .

Aucune usine ne fabrique de fibres de verre courtes dans notre région. Mais il existe une production très voisine, sous la forme de fibres de roche volcanique : c'est l'objectif de ROCKWOOL Isolation, dont l'usine est implantée à Saint-Eloy-les-Mines, entre Riomet Montluçon. C'est en 1976 que cette Société, d'origine danoise et fondée en 1909, a introduit les matériaux d'isolation en laine de roche sur le marché français. En 1978, la filiale française était créée, et, en 1980, démarrait la première unité de production sur le carreau de la mine de charbon, qui venait de fermer. Une nouvelle unité de fabrication, parallèle à la première, vient d'entrer en service ; elle permet le doublement de la production. L'entreprise auvergnate détient ainsi près du quart du marché français des matériaux d'isolation pour le bâtiment.

Le matériau utilisé est d'origine naturelle et locale : il s'agit de basalte, soigneusement sélectionné pour sa pureté et son point de fusion le plus bas possible. La roche, concassée, est fondue au cubilot à 1600°C. La coulée de basalte fondu reproduit, à petite échelle, la lave issue d'un volcan. Le filet liquide est envoyé sur une machine à fibrer, constituée de disques tournant à grande vitesse, comme dans le cas du verre ; les fibres se forment en continu sous l'action conjuguée de la centrifugation et du refroidissement.

Les fibres, encore chaudes, reçoivent par pulvérisation, un enduit de résine phénolique. Elles sont ensuite aspirées sur un tapis collecteur métallique, dans une chambre à dépression. Elles vont alors former une nappe

qu'un dispositif pendulaire structure, en croisant les orientations ou en les inversant, en fonction de l'épaisseur et de la densité du matelas souhaitées.

La nappe passe ensuite dans une étuve, où la résine précédemment déposée est polymérisée. Cette opération assure la cohésion des fibres entre elles et garantit une grande stabilité dimensionnelle à la nappe. Celle-ci est alors débitée en panneaux, ou conditionnée en sacs.

ROCKWOOL Isolation, Société dynamique, en pleine expansion, a redonné vie à une région gravement touchée sur le plan économique par la disparition de son activité minière.

FABRICATION DES FIBRES LONGUES

Il s'agit cette fois de fibres dont la longueur s'exprime en kilomètres ; la fabrication s'apparente à celle du fil textile. On met en œuvre un processus d'étrirage mécanique. Le matériau employé est un verre borosilicaté ($\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$). Il offre, comme nous l'avons vu dans l'étude des propriétés physiques, une grande résistance mécanique, et se prête bien à l'étrirage à chaud. Le diamètre du fil formé dépend de la température et surtout de la vitesse d'étrirage. On obtient couramment des fibres de 10 à 20 μm de diamètre ; par étrirage à très grande vitesse, on peut obtenir des fibres jusqu'à 3 μm de diamètre.

Le verre fondu passe dans une filière en céramique placée à la sortie du four. La fibre obtenue est enroulée sur un tambour tournant à grande vitesse : la vitesse linéaire d'étrirage doit atteindre plusieurs centaines de mètres par seconde. On peut appliquer à ce processus purement mécanique l'effet thermique d'un courant de gaz chaud dans le sens de l'étrirage ; on peut ainsi contrôler plus facilement le diamètre de la fibre obtenue, et éventuellement le réduire à la demande.

Remarquons que si l'on transforme 1 kg de verre borosilicaté, dont la masse volumique est $2,5 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, on dispose d'un volume de matériau de $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, soit 0,4 dm³. En transformant cette quantité en une fibre cylindrique de 10 μm de diamètre, on obtient une longueur de $5 \times 10^6 \text{ m}$, soit 5000 km. Si la vitesse d'étrirage choisie est 200 km.h⁻¹, l'opération de filage doit durer 25 heures !

Ces fibres longues, destinées à la fabrication de trames ou de tissus de renforcement de matériaux composites, ont des résistances mécaniques considérables, à condition que l'état de surface soit rigoureusement exempt de défaut : c'est la qualité de la filière qui conditionne cet état. Dans des conditions idéales, le module d'YOUNG atteint 100 GPa (10^{11} Pa). La résistance mécanique à la rupture peut aller jusqu'à 3 GPa, ce qui permet à la fibre de supporter sans rompre une force de 0,225 N.

Les fibres longues, sont, dès leur fabrication, revêtues d'un apprêt, dont le rôle est double : protéger la surface de la fibre avant

son utilisation, et faciliter la liaison du verre avec la résine dans laquelle la fibre sera noyée. C'est l'ensimage.

La technologie d'élaboration des fibres longues est en pleine évolution : le choix des matériaux et les conditions d'étirage permettent une excellente adaptation des fibres aux applications multiples qu'offre le verre dans ce domaine.

LES VITROCERAMIQUES

Nous avons vu que la cristallisation d'un verre – dans le langage technique on dit plutôt sa **dévitrication** – est un phénomène accidentel que les verriers cherchent à éviter à tout prix. Elle se traduit par l'apparition de zones opaques et fragiles dans la matière vitreuse transparente. Cette dévitrication peut se produire quand on maintient longtemps le verre à haute température juste après sa fabrication. On conçoit que ces conditions favorisent la migration des ions et la réorganisation du réseau régulier de la silice. Les zones cristallisées se développent à partir d'un germe, envahissant progressivement tout le volume du matériau.

Dans le cas de la silice pure, par exemple, la dévitrication s'opère le plus souvent à partir de la surface. Celle-ci est contaminée par des impuretés provenant de l'atmosphère du four, pendant la coulée. Ce sont surtout des composés alcalins ou alcalino-terreux, qui peuvent abaisser de 200 à 300°C la température du début de cristallisation. On remarque que la surface du matériau devient légèrement granuleuse. En laissant refroidir, on constate que des écailles translucides se détachent vers 275°C. En les étudiant aux rayons X, on obtient le spectre caractéristique d'un composé cristallisé : l'analyse structurale permet d'identifier la **crystalbite**, variété cristallisée de SiO_2 , stable entre 1470°C et le point de fusion de la silice, mais capable de subsister à des températures inférieures dans un état **métastable**. Dans le cas des verres sodocalciques, le comportement est le même, mais les germes sont constitués de silicates alcalins ou alcalino-terreux tels que SiO_3Na_2 , SiO_3Ca , SiO_4Na_4 , SiO_4Ca_2 , etc...

Il y a une trentaine d'années, on a cherché à tirer profit de ce phénomène plutôt nuisible. Dans ce but, on incorpore volontairement dans le verre fondu des agents de cristallisation (ZnO , ZrO_2 , TiO_2 + P_2O_5 ,...) dont le comportement est parfaitement connu. On s'efforce de les répartir uniformément dans tout le volume. Puis on opère un traitement thermique qui se déroule en deux temps :

- par refroidissement, on provoque la formation d'un très grand nombre de germes cristallins (nucléation) ;
- en réchauffant le matériau, on favorise la croissance de ces germes, monocristallins, sous forme de petits grains dispersés dans la matrice vitreuse. On contrôle soigneusement la composition chimique des grains, qui

se forment aux dépens de cette matrice. L'idéal est d'obtenir un très grand nombre de grains (typiquement 10^{15} ou 10^{16} par cm^3) de volume unitaire uniforme, représentant un pourcentage bien défini du volume total.

A titre d'exemple, on peut traiter de cette manière le mélange d'oxydes SiO_2 – Al_2O_3 – Li_2O . Les cristaux qui se forment ont des propriétés physiques très anisotropes : en particulier, ils ont trois coefficients principaux de dilatation linéaire très différents : l'un est positif, les deux autres négatifs ; la conséquence de cette anomalie est que le volume d'un tel monocristal diminue lorsqu'on élève sa température. En ajustant le rapport du volume des cristaux formés sur le volume de la matrice vitreuse restante, on peut faire en sorte que la dilatation du verre soit exactement compensée par la diminution de volume des cristaux. Le matériau formé a alors un coefficient de dilatation volumique quasi-nul. Son isotropie moyenne assure aussi un coefficient de dilatation linéaire remarquablement faible. C'est ainsi que le matériau vitrocéramique dénommé ZERODUR et fabriqué par la firme allemande SCHOTT offre les caractéristiques suivantes :

- Taille moyenne des cristaux : 50-55 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).
- Rapport masse des cristaux/masse totale : 70 à 78 %.
- Coefficients de dilatation linéaire dans différentes plages de température : de -180°C à $+20^\circ\text{C}$: $\lambda = -1,6 \times 10^{-7}\text{K}^{-1}$; de 20°C à 300°C : $\lambda = 5 \times 10^{-8}\text{K}^{-1}$; au dessus : $\lambda = 2 \times 10^{-7}\text{K}^{-1}$.

L'intérêt de tels matériaux est évident : c'est un verre, avec tous les avantages technologiques correspondants : facilité de moulage, d'usinage ; stabilité dans le temps ; inaltérabilité ; très bonnes propriétés mécaniques, thermiques, électriques... Ainsi le ZERODUR est un matériau transparent, de masse volumique $\rho = 2,53 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Le module d'YOUNG est $E = 9,1 \times 10^4 \text{ MPa}$, soit 91 GPa, ce qui place ce matériau au même niveau que le verre pour fibres optiques : le coefficient de POISSON est 0,24, comme un verre courant.

La chaleur massique à pression constante est légèrement plus élevée que celle du verre ordinaire ($821 \text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$). La conductivité thermique est également un peu plus grande que celle de la silice vitreuse ($1,64 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Les propriétés électriques sont celles d'un excellent diélectrique : la permittivité relative $\epsilon_r = 7,4$ (elle est mesurée à 25°C , pour un champ alternatif de fréquence 1 MHz). La conductivité électrique totale est voisine de celle des verres ordinaires : $5 \times 10^{-12} \text{ S.m}^{-1}$ à 20°C . Elle dépend beaucoup de la température : ainsi, à 100°C , elle passe à 10^{-8} S.m^{-1} ; à 500°C , à $1,43 \times 10^{-2} \text{ S.m}^{-1}$; à 700°C , elle est égale à $0,25 \text{ S.m}^{-1}$.

Le ZERODUR n'a pas les propriétés optiques d'un verre, mais son homogénéité est suffisante pour permettre quelques applications.

Son indice est compris entre 1,542 et 1,554 dans le spectre visible ; la constringence est $\nu = 56$. Par suite de la présence de cristaux dispersés dans le volume, le ZERODUR présente une diffusion de RAYLEIGH observable, mais sa biréfringence est négligeable.

Les applications sont nombreuses. Citons, dans des domaines prestigieux, la réalisation de miroirs de télescopes, d'instruments d'optique embarqués sur satellites ; de miroirs pour faisceaux lasers, soumis à des flux énergétiques extrêmes ; de supports de très grande stabilité dimensionnelle (résonateurs optiques, microscopes à effet tunnel...). On peut aussi en faire des calibres et des cales étalon. Bien entendu, il existe un très grand nombre d'applications plus courantes, car les vitrocéramiques ne sont pas des matériaux extrêmement coûteux lorsqu'on les fabrique industriellement : on en utilise de plus en plus dans les appareils ménagers. C'est ainsi que CORNING s'est spécialisé dans la fabrication de récipients à usage culinaire (pyroflam) ou de tables de cuisson (pyroceram).

Remarquons d'ailleurs qu'il est possible d'obtenir une céramisation **superficielle** des objets : les composants favorisant la nucléation sont alors introduits par traitement chimique externe, et ne peuvent pénétrer que dans une « peau » de faible épaisseur. La formation de petits cristaux est limitée à cette couche, à laquelle elle confère des propriétés mécaniques supérieures à celle de substrat. Cette procédure peut être assimilée à une trempe physico-chimique avec mise en compression de la couche superficielle. Elle favorise en particulier la dureté de la surface (résistance à la rayure) et diminue fortement la fragilité des pièces ainsi traitées. (Cette technique s'apparente à la cémentation ou à la nitruration en métallurgie, ou à l'émaillage des porcelaines ou des faïences).

Il existe une application originale, également développée par CORNING, (PHOTOCE- RAM, PHOTOFORM), dont l'intérêt s'est révélé considérable. Il s'agit de vitrocéramiques pouvant être formées par l'action d'un rayonnement, sous l'effet d'un processus comparable au développement photographique. Dans un verre de composition spéciale sont dispersés des agents de nucléation sensibles à la lumière. Au cours de la formation de la vitrocéramique, on ne génère de monocristaux que dans les parties exposées au rayonnement (presque toujours ultra-violet). On obtient des domaines vitrocéramiques de contours parfaitement contrôlés, dans un matériau resté vitreux, donc transparent. Ce phénomène est déjà porteur d'applications utiles, mais on peut en tirer parti de façon plus large. Il est bien connu qu'un matériau cristallisé est plus vulnérable aux agents agressifs (acides par exemple) que le matériau vitreux de même composition chimique. Il est donc possible d'attaquer sélectivement le « composite » verre-vitrocéramique : ceci permet de graver des motifs de très petite dimension (de

CONFERENCE

▷▷▷

l'ordre du dixième de millimètre) sur une lame de verre, ou de faire des trous dans une lamelle de très faible épaisseur (10000 trous par cm^2 !). Des applications très prometteuses s'offrent dans cette voie en micro-électronique, en physique, en chimie ou en biologie. Ainsi, des grilles formant une trame fine et régulière sont utilisées dans les nouveaux écrans plats de télévision.

En conclusion, insistons sur le fait que les vitrocéramiques ouvrent des perspectives immenses, essentiellement dûes aux aspects antinomiques de leurs constituants : l'un vitreux, l'autre cristallisé ; en jouant sur les proportions de chacun, on fait varier très largement l'ensemble des propriétés physiques du matériau. Mais il existe un revers à la médaille : la maîtrise de cette technologie exige une connaissance parfaite de la structure des cristaux (ce qui est relativement accessible avec les rayons X) et celle du verre environnant (ce qui est beaucoup plus difficile). Des progrès déterminants sont à prévoir dans les 10 ans à venir.

ERRATA

L'élimination des erreurs ou des fautes de frappe est la bête noire des rédacteurs d'articles. C'est, à mon sens, plus ingrat et plus difficile que d'écrire le papier. Et, à chaque parution d'un nouveau numéro d'Auvergne-Sciences, je me rends compte de l'insuffisance de la lecture des épreuves avant tirage. Bien sûr, les lecteurs corrigent d'eux-mêmes les fautes d'orthographe, les omissions de signes ou de mots, etc... Mais il ne leur est pas toujours possible de rectifier une valeur numérique erronée ou une formule inexacte. Ainsi, dans l'article sur le verre paru dans le numéro 14 de notre revue, se trouvent deux exemples de tels défauts :

Page 9 : au dessus de la figure 6 : à la place de P_6O_{10} ($3 \text{P}_2\text{O}_3$) il faut lire P_4O_{10} ($2 \text{P}_2\text{O}_5$).

Page 13 : en haut et à gauche :

au lieu de 10^{-18}S.m^{-1} , il faut lire 10^{-16}S.m^{-1} .

Dans la première famille d'erreurs (plus répandue, mais moins grave, car l'anomalie saute aux yeux) l'une a pu faire sourire le lecteur : dans le compte rendu de la visite du CETIM, à Saint-Etienne, c'est bien sûr une VEILLE technologique (et non une vieille) qu'assure cet organisme ! Et toujours dans l'article sur le verre, page 11 à droite, la silice vitreuse présente un coefficient de dilatation volumique $\alpha = 1,7 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$ (et non $1,7 \times 10^6$, ce qui serait dramatique !). Remarquons à ce sujet l'utilisation du degré Celsius comme unité de température : en toute rigueur, c'est le KELVIN (K) qu'il faut employer. Lorsque j'ai exprimé des résultats en $^{\circ}\text{C}$, c'est à dessein : ils ne sont valables qu'au voisinage de la température ambiante, où l'échelle CELSIUS est bien définie.

M. MASSAUX

(à suivre)

LES VERRS CORRECTEURS DE LA VISION

par Michel Henry*

« Bonjour lunettes, adieu fillettes »

affirme plaisamment un dicton du siècle dernier, mettant l'accent sur la corrélation entre l'âge et le port de lunettes. De fait, la presbytie est restée longtemps le défaut de la vision le plus corrigé, sans doute parce qu'il est le seul inéluctable.

INTRODUCTION

Dans les pays très développés, les statistiques récentes montrent qu'environ une personne sur deux doit avoir recours à l'art pour pallier une mauvaise vue.

En fait tout milite dans ce sens : l'élévation du niveau de vie permet de consacrer une part croissante du budget aux soins corporels, l'allongement de la vie fait que tous ou peu s'en faut sont atteints de presbytie, et surtout la modification du mode de vie fait consacrer une part croissante de l'activité à des travaux de précision : lecture, écriture, dessin... contraignant les yeux à fonctionner à la limite de leurs possibilités.

Dans la majorité des cas, la correction des défauts de la vision est possible, et fait appel à diverses techniques dont la plus ancienne et la plus répandue est le port de lentilles enchassées dans une monture rigide, les lunettes.

Après un court historique, nous rappellerons la structure optique de l'œil et les défauts les plus courants, puis nous examinerons les conditions de correction par des lunettes.

Nous excluons ici les troubles d'origine pathologique relevant du domaine de la médecine plutôt que de celui de l'optique. Nous ne nous étendrons pas non plus, malgré leur intérêt, sur les lentilles de contact, qui relèvent d'une technique un peu différente et surtout qui méritent un exposé complet à elles seules.

Un dernier mot : pour la commodité de l'exposé, nous parlons de lunettes. Il doit être bien entendu que les télescopes dioptriques, aussi nommés lunettes dans la langue courante, ne font pas partie de notre propos.

* Michel HENRY, Maître de Conférences, Université Pierre-et-Marie Curie - PARIS.

(1) Mais un écrit de l'époque – peut être une satire – traite les porteurs de lunettes de malades, voire de fous...

(2) Dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, la fabrication des lunettes est traitée avec le travail du verre et la miroiterie.

DES LUNETTES, DEPUIS QUAND ?

Si étrange que cela puisse paraître, les lunettes sont nées de père inconnu. Yasco Ronchi en fixe l'origine avec précision : entre 1280 et 1285 dans la vallée de l'Arno, en Italie. Précision sans doute excessive ; Bernard Maitte, lui, remonte au XI^e siècle, ce que semblent confirmer les études de Grosseteste (cf. infra) ; Pierre Germa, enfin, plus prudent, n'exclut pas l'hypothèse d'une origine extérieure, non précisée d'ailleurs ; Daguin (en 1868) parle d'« une lentille de verre trouvée dans un très ancien tombeau romain » mais cette piste semble abandonnée par les historiens modernes.

Les seuls documents authentiques faisant mention de lunettes datent de la fin du XIII^e siècle et du début du XIV^e siècle.

De l'antiquité, qu'elle soit égyptienne, grecque, romaine, ou encore chinoise, hindoue, américaine... nous connaissons par des fresques, des gravures, des peintures... mille et un détails de la vie quotidienne, du chaudron de la cuisinière au sceptre du roi. Le Livre des Morts, vade-mecum du parfait voyageur de l'au-delà dans l'antiquité égyptienne, contient de nombreuses représentations de scribes, avec leurs papyrus, leurs roseaux taillés et leurs pots d'encre mais de lunettes point. Il serait étrange, si les lunettes avaient existé, que les scribes n'en aient pas été les premiers bénéficiaires, dans une administration aussi « paperassière » que celle des pharaons, et encore plus que cet instrument de première nécessité n'ait figuré ni sur les documents ni dans les sépultures.

Force nous est donc de conclure que les anciens, s'ils connaissaient les défauts de la vision, ne savaient pas les corriger.

L'empereur Néron, raconte Pline, utilisait une émeraude pour suivre les combats de gladiateurs. Cette anecdote a été surabondamment commentée, mais il suffit de relire Pline pour comprendre que cette pierre ne jouait qu'un rôle de protection contre la lumière éblouissante de l'arène, et en aucun cas d'aide à la vision.

Ne pas avoir de père n'empêche pas les lunettes d'avoir une histoire : la réflexion et la

réfraction étaient connues des anciens grecs, puis des romains et des arabes.

Sénèque, puis Lucrèce expliquent qu'un flacon sphérique plein d'eau permet d'agrandir les objets, sans toutefois en tirer de conclusions pratiques...

Vers l'an mil, Ibn al Haitham (aussi connu sous le nom d'Alhazen) avait correctement établi le mécanisme de la vision et le rôle de la cornée et du cristallin. Il décrit pratiquement une loupe : lentille plan convexe grossissant l'écriture sur laquelle on la place, mais ne semble pas avoir réalisé l'expérience.

Deux siècles plus tard, l'ouvrage d'Ibn al Haitham est traduit en latin et se répand dans les monastères. Le Roman de la Rose (ca. 1250) y fait allusion :

«Alhazen [c'est l'autre nom d'Ibn al haytham], qui n'était pas... un sot, composa le *Traité des Regards* ; le *clerc naturaliste... doit consulter ce livre*».

Robert Grosseteste (1168-1253), puis son disciple Roger Bacon étudient les propriétés des lentilles, mais ne réussissent pas à établir clairement le mode de formation des images, qui ne sera élucidé que quatre siècles plus tard par Képler. Reprenant les idées d'Ibn al Haitham, les moines de l'ouest de l'Europe – à cette époque les cloîtres étaient les seuls foyers de culture – fabriquent des «pierres de lecture», lentilles plan-convexes qu'ils posent directement sur leurs parchemins et qui agrandissent lettres et enluminures.

Le passage des «pierres de lecture» aux lunettes, que l'on tient devant les yeux, nous est inconnu. Selon toute probabilité, elles sont dues à des artisans verriers italiens. Ceux-ci fabriquaient des disques de verre transparents, à faces convexes, et en parsemaient les vitres des fenêtres, pour satisfaire à la mode du temps. L'un d'eux, sans doute âgé et presbyte, s'aperçut que de tels disques amélioraient sa vision. Dans leur simplicité et leur ignorance du grec ils baptisèrent lentilles ces verres, par analogie de forme avec le légume bien connu. Comme le note Yasco Ronchi, «Jamais à l'époque scientifique n'aurait donné le nom d'un légume à une de ses découvertes».

Or le monde scientifique, constatant que les lunettes faisaient voir les objets plus grands ou plus petits que nature, les irisaient, bref en modifiaient considérablement l'apparence, les condamna sans appel. Il faudra attendre plus de trois siècles pour que les lentilles, et singulièrement celles des lunettes, quittent l'échoppe de l'artisan pour le laboratoire du savant.

Quoi qu'il en soit, dès 1299, l'auteur d'un manuscrit affirme «ne pas pouvoir lire sans ces verres qu'on a inventés depuis peu». Dès le début du XIV^e siècle, l'usage en est (relativement) courant. Elles sont cerclées de corne ou de métal, et unies par deux tiges fixées d'un clou, d'où leur nom de «clouants».

D'Italie, l'instrument passe en Allemagne, puis en Flandre, en France et en Espagne puis, progressivement, dans le monde entier. Un écrivain anglais du XV^e siècle doit avoir vu en Chine, à Pékin, des lunettes que leur propriétaire «avait échangées contre un vigoureux cheval à un marchand venu d'Europe». Les «verres» sont taillés dans... du verre, mais aussi divers cristaux transparents comme le quartz, le béryl...

On attribue à Clémence de Hongrie, alors veuve du roi de France Louis X le Hutin, le nom de «bericles» qui deviendra «besicles» et survivra fort longtemps puisque Bouasse l'emploie encore au début du siècle.

A la même époque, les verres ronds sont comparés à de petites lunes, d'où le nom de lunettes qui leur est resté jusqu'à nos jours : en 1364 Pétrarque dit que sa vue baisse et qu'il doit se servir de lunettes.

Vers 1450, Gutenberg invente l'imprimerie et les professeurs de se désoler : puisqu'ils ont des livres, les étudiants n'assisteront plus aux cours. Non seulement l'assiduité ne faiblit pas, mais l'accroissement du nombre de lecteurs assure le succès des lunettes. Peu pratiques, les clouants qu'il fallait tenir à la main font place à des pince-nez puis à des lunettes à lanière faisant le tour de l'oreille ou fixées au chapeau par une tige verticale.

Au XV^e puis au XVI^e siècle, la mode se répand : il est indispensable de porter des lunettes pour être «dans le vent»⁽¹⁾. Les peintres voulant honorer leurs riches clients ajoutent des lunettes à leurs portraits, voire à ceux des saints. En 1532, Jacobs van Heemskerck peint La Vierge et l'Enfant. Sur le tableau figure Saint-Luc portant besicles...

Les lunettes de l'époque ne comportent que des verres convergents destinés à corriger la presbytie. Il faut attendre le XVI^e siècle pour que soient mis au point les verres concaves permettant de corriger la myopie, et le XVIII^e pour les montures à branches facilitant leur port, inventées par l'opticien Thomin en 1746.

Parallèlement aux progrès de la correction, la mode s'empare des lunettes : les verres deviennent colorés, leur taille subit des fluctuations que ne justifient pas toujours l'optique ni la médecine. Marie Leczinska utilise ses «beaux yeux», un bésicle pliant dont les deux verres se replient l'un sur l'autre. Chacun se souvient du «face à main» des incroyables et des merveilleuses, sous le Directoire ; sous le Second Empire, on s'arrache les petits binocles que l'on peut ranger dans un pommeau d'ombrelle, et la III^e République est toute entière dans les petites lunettes rondes cerclées d'acier de «Monsieur Thiers», symbole d'économie et de vertu bourgeoise. C'est à cette époque qu'apparaissent les noms de binocle, dans le très sage Journal des Dames et des Demoiselles,

et de Iorgnon, qui, lui, serait dû à Victor Hugo.

Les progrès les plus notables datent de notre siècle : En 1905, Ostwald et Tscherning remplacent les verres biconcaves lourds et générateurs d'aberrations par des ménisques, plus légers et mieux adaptés ; en 1959 la société française Essilor crée le verre Varilux à variation continue de convergence qui permet aux presbytes de n'utiliser qu'une seule paire de lunettes et concurrence favorablement le verre bifocal mis au point par... Franklin.

Il est difficile d'exposer l'histoire des lunettes sans parler de leurs fabricants, les opticiens-lunetiers.

Nous avons déjà signalé que les premiers d'entre eux étaient des artisans. Assez rapidement ils s'organisèrent en corporation au cours du XIV^e siècle, choisissant pour saint patron Saint Clair, évêque de Nantes qui avait, disait-on, le pouvoir de guérir les aveugles.

En 1465, sous Louis XI, la corporation des lunetiers est la 49^e sur les 300 que comptait la bonne ville de Paris. En 1525, ils furent réunis aux miroitiers, réunion confirmée par Henri III qui profita d'une réorganisation des corporations pour leur adjoindre... les bimbelotiers⁽²⁾.

En 1720, les lunetiers prennent le nom d'opticiens. Ils sont si nombreux à Paris que le quai de l'Horloge, dans l'île de la Cité, s'appelle le Quai des Lunettes. Il en va de même en province où de gros commerçants offrent une gamme très étendue de produits : l'opticien de Troyes à l'enseigne de «La Flotte des Indes» n'hésite pas à annoncer dans sa publicité : «Le sieur Voisin fait et vend toutes sortes d'ouvrages dépendants d'optique, tels que sont toutes sortes de lunettes pour conserver la vue, pour les vues courtes de naissance, pour les vues basses, pour ceux qui ont eu des cataractes. Bésicles pour empêcher les enfants de tourner la vue. Demi-masques à deux verres pour aller en campagne, qui garantissent les yeux du froid et du vent. Lunettes de toutes espèces à tous âges et de toutes sortes de vues, telles qu'on puisse les souhaiter».

Il n'est pas jusqu'aux «pieds poudreux», les colporteurs qui ne transportent dans leur baluchon des lunettes qu'ils vendent aux habitants des villages les plus reculés.

Assez curieusement, les étuis à lunettes, bien que vendus par les opticiens, sont fabriqués par les gainiers doreurs sur cuir. Là encore, la mode joue un rôle au moins aussi important que la nécessité d'une bonne protection. Les plus renommés, en paille de riz ou même en laque d'or sont importés à grands frais d'Extrême-Orient...

L'ŒIL ET SES DÉFAUTS

L'ŒIL COMME SYSTÈME OPTIQUE

L'anatomie de l'œil est bien connue du lecteur, aussi n'insistons nous pas sur ce point. Pour les optométristes, l'œil est un système op-

tique comme les autres, assimilé dans les cas les plus simples à une lentille mince ou, mieux, à un dioptré sphérique (modèle de Listing) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Indice de réfraction antérieur : $n = 1$
- Indice de réfraction postérieur : $n' = 1,32$
- Rayon de courbure : $R = 6 \text{ mm}$

La pupille d'entrée est pratiquement confondue avec le diaphragme d'ouverture et avec la pupille de sortie. Il s'agit bien entendu de la pupille au sens usuel du terme.

Le globe oculaire tourne autour d'un centre de rotation situé à environ 15 mm du sommet de la cornée, c'est-à-dire à 10 mm en arrière de la pupille.

Un autre paramètre important est le champ visuel. Il est de l'ordre de 160°, mais la vision n'est nette que sur un champ de l'ordre du degré.

Toutefois, les mouvements de l'œil permettent d'atteindre un champ de vision nette de l'ordre de 60°. Il est à noter que ces mouvements sont incessants et, la plupart du temps, inconscients : l'œil balaye sans cesse l'espace visuel situé devant lui.

La valeur précédente est un maximum, le champ de vision nette effectif ne dépassant pas 10 à 20°, les mouvements de l'œil étant le plus souvent accompagnés de mouvements de la tête.

DÉFAUTS DE LA VISION

Par convention, les défauts de la vision sont les écarts à la vision dite « normale », les aberrations propres à l'œil en tant qu'instrument d'optique n'étant pas prises en compte.

L'œil « normal » dit aussi « emmétrope » présente, du moins en première approximation, une symétrie sphérique. Il voit nettement sans fatigue les objets situés à grande distance, au delà d'une vingtaine de mètres, ce que nous traduisons par l'expression « *punctum remotum* » (ou, plus brièvement, *remotum*) situé à l'infini.

Il est capable d'accommoder, c'est-à-dire de modifier la courbure de la face avant et l'indice de réfraction de son cristallin. Il peut ainsi voir nettement des objets plus rapprochés, jusqu'à quelques centimètres pour un enfant d'une dizaine d'années.

Le point limite d'accommodation est dit « *punctum proximum* » ou plus brièvement *proximum*.

Plutôt que ces distances, les optométriciens utilisent leurs inverses, qu'ils mesurent en dioptries. Un paramètre important est l'amplitude dioptrique, différence entre l'inverse de

la distance du *remotum* et l'inverse de la distance du *proximum*.

Les défauts de la vision correspondent à des écarts importants par rapport à ces valeurs.

Inéluctable parce qu'associée au vieillissement est la presbytie. L'œil perd progressivement sa faculté d'accommoder, si bien que le *punctum proximum* et le *punctum remotum* s'éloignent de l'œil. Le premier effet est en général le plus sensible car il se produit plus tôt et qu'il est le plus gênant. Par convention, l'œil est dit presbyte quand le *proximum* est plus éloigné que la distance moyenne de travail rapproché, soit une trentaine de centimètres.

La table classique de Donders (1864) donne les positions du *punctum proximum* et du *punctum remotum* à divers âges. Elles sont établies subjectivement, en cherchant les distances de vision nette. Des mesures plus récentes, obtenues par détermination optométrique du conjugué de la rétine, conduisent à des valeurs comparables.

Age années	P. Remotum m	P. Proximum m
10	∞	0,07
20	∞	0,10
30	∞	0,14
40	∞	0,22
50	∞	0,40
60	- 2,00	2,00
70	- 0,80	- 1,00

Il est à noter que les deux *punctums* deviennent virtuels avec l'âge.

L'amplitude dioptrique est de l'ordre de 15 dioptries chez l'adolescent et diminue jusqu'à 0,25 dioptrie chez le vieillard.

La presbytie est, nous l'avons dit, le sort commun ou peu s'en faut. Les autres défauts, dits amétropies, sont moins fréquents.

La formation de l'image associe la position de la rétine (la longueur de l'œil) et la convergence des surfaces dioptriques. Il était d'usage de distinguer une amétropie axiale ou de position, et une amétropie de puissance, pour l'essentiel liée à la courbure des dioptries plutôt qu'à leur indice de réfraction. Cette distinction tend toutefois à s'estomper, l'amétropie étant de nos jours considérée comme résultant d'un déséquilibre entre les divers composants de l'œil.

La distinction importante est en fait celle entre myopes dont le *remotum* est réel et à distance finie, et les hyperopes (ou hypermétropes) dont le *remotum* est virtuel et lui aussi à distance finie. La myopie, comme l'hyperopie, sont mesurées par la réfraction, inverse de la distance du *remotum* à l'œil, exprimée en dioptries. Des valeurs supérieures à 4 ou 5 dioptries sont rarissimes.

Notons que l'amplitude dioptrique est sensiblement indépendante de l'état de l'œil, à âge égal, si bien que le *proximum* d'un myope

est plus proche de l'œil que celui d'un emmétrope, lui-même moins éloigné que celui d'un hyperope.

Les statistiques sont assez difficiles à interpréter, en raison notamment du choix de la population étudiée⁽³⁾. Les diverses estimations coïncident toutefois assez bien, et donnent de 10% à 15% de myopes pour 35% d'hyperopes « forts », le reste regroupant les emmétropes et les hyperopes « légers » (moins d'une dioptrie).

Signalons en passant que les bébés sont fortement hyperopes (environ 2 dioptries), le développement de l'œil ne se terminant que plusieurs années après la naissance.

Autre défaut, différent des précédents mais éventuellement cumulable avec eux, l'astigmatisme résulte d'un défaut de symétrie sphérique de l'œil. La convergence n'est pas la même dans les divers plans passant par l'axe. Dans la plupart des cas (astigmatisme régulier), la convergence est maximale dans un azimut, et minimale dans l'azimut perpendiculaire.

L'astigmatisme est mesuré par la différence des convergences maximale et minimale. Il est en fait très répandu, plus de 90% de la population en étant atteint, mais n'est gênant que pour une fraction notablement inférieure, de l'ordre de 15% à 20%, surtout des personnes astreintes à observer des structures régulières : lettres, dessins, plans...

Signalons enfin ce qui n'est pas à proprement parler un défaut, mais qui a été très longtemps justiciable des mêmes procédés de correction, l'aphakie, disparition du cristallin après une maladie comme la cataracte. L'œil aphake ne peut évidemment plus accommoder, et se comporte comme une hyperope très forte, de l'ordre d'une quinzaine de dioptries.

PRINCIPE DE LA CORRECTION AMÉTROPIES SPHÉRIQUES

Nous nous limitons pour le moment aux amétropies sphériques ainsi qu'à la presbytie et à l'aphakie.

Le principe de correction est assez simple : il faut ramener le *punctum remotum* de l'œil à l'infini. Une fois ce résultat obtenu, le *punctum proximum* de l'œil prendra automatiquement une position acceptable compte tenu de l'amplitude dioptrique de l'œil.

De ce point de vue, le presbyte est traité comme un hyperope, à cette différence qu'il ne se sert de ses lunettes que pour la vision rapprochée. Il s'agit là d'une contrainte de confort quelquefois difficile à supporter, à laquelle divers remèdes sont apportés : demi-lunettes, verres bi- ou tri-focaux, verres à convergence progressive.

Il est exclu d'utiliser d'autres systèmes optiques que les systèmes minces : les conditions de poids et d'encombrement primant toutes les autres. De plus, un système épais

(3) Ainsi, une étude portant sur des recrues ne concerne qu'une population masculine jeune, dont ont été déjà éliminés les éléments extrêmes, inaptes au service militaire.

(4) Il revient au même de dire que le grandissement des images n'est pas modifié par la correction.

réduirait le champ de vision indirecte dont le rôle essentiel est d'avertir des « agressions » et collisions possibles et serait de ce fait trop dangereux.

Se posent alors les problèmes essentiels : déterminer la convergence du verre à utiliser, sa forme – ou cambrure – et sa position par rapport à l'œil.

Le verre correcteur ne doit pas être placé au petit bonheur : la plupart des personnes ont deux yeux différents et une vision binoculaire normale ; si nous opérons sans précautions, nous avons toutes les chances de réaliser deux ensembles verre-œil de convergences différentes, qui formeront sur la rétine des images de tailles différentes. La fusion binoculaire sera alors difficile, sinon impossible, et le remède pire que le mal.

Il convient donc que la convergence de l'ensemble verre-œil ait la même valeur que celle de l'œil non corrigé⁽⁴⁾.

Le théorème de Gullstrand nous permet de calculer la distance entre le verre et l'œil. Soient D et D' les convergences du verre et de l'œil, respectivement, et e la distance entre le verre (en toute rigueur son plan principal image) et l'œil (en toute rigueur son plan principal objet). Nous avons :

$$D + D' - e.D.D' = D'$$

par hypothèse. Par suite, $eD = 1$. Autrement dit, le verre doit être confondu avec le foyer objet de l'œil, soit à 16 mm environ du sommet de la cornée. La correction se réduit alors à un simple glissement du plan principal image et du foyer image de l'œil.

Cette conclusion doit être nuancée par des considérations d'esthétique, très importantes en lunetterie. La distance précédente est souvent considérée comme trop importante, et la distance retenue est le plus souvent de l'ordre de 12 mm, limitée par la longueur des cils. Quand ceux-ci touchent le verre, ils y déposent des sécrétions et le rendent rapidement trouble.

Une fois le verre positionné par rapport à l'œil, la coïncidence de son foyer principal image et du punctum remotum permet d'en déterminer la convergence.

Pour des raisons pratiques, les opticiens utilisent des points aisément accessibles aux mesures : le sommet de la cornée de l'œil, le sommet du dioptré postérieur du verre. La convergence utilisée est en fait la puissance frontale image, inverse de la distance entre le sommet du dioptré postérieur et le foyer principal image. Pour la plupart des verres, cette puissance frontale est peu différente de la convergence habituellement utilisée en optique.

Reste la cambrure, valeur moyenne des deux courbures des dioptrés limitant la lentille et qui caractérise, à convergence égale, la forme de la lentille : ainsi, une lentille biconvexe a une cambrure plus faible qu'une ménisque convergente.

Pour la vision axiale, et dans l'approximation de Gauss, la cambrure n'a aucune impor-

tance. Par contre, l'œil possède un champ de vision directe de l'ordre de 60°, ainsi que nous l'avons vu, et il convient que la totalité de ce champ reste accessible au porteur de lunettes.

La pupille de l'œil limite un étroit pinceau de rayons lumineux. Quand le rayon moyen de ce pinceau fait un angle important avec l'axe optique du verre, l'image d'un point – mettons à l'infini pour fixer les idées – n'existe plus. Le pinceau s'appuie sur deux zones de rétrécissement dites focales tangentielle et sagittale d'autant plus éloignées que l'angle d'incidence est plus important.

Il est possible de calculer la distance de ces deux focales, l'astigmatisme oblique, en fonction des caractéristiques optiques des deux dioptrés constituant le verre, et de chercher à quelle condition il s'annule. Nous ne développerons pas ici ce calcul et donnerons le résultat pour un point objet à l'infini, et des rayons lumineux pas trop inclinés sur l'axe. Nous choisissons pour variables la convergence D du verre et la courbure c de l'un des dioptrés. La condition de suppression de l'astigmatisme oblique est alors une équation du second degré dont la représentation graphique dans le système d'axes (D, c) est une ellipse dite ellipse de Tscherning (1904).

Pour chaque convergence, il existe deux courbures, donc deux cambrures, permettant de supprimer l'astigmatisme oblique. Ces deux cambrures correspondent à des ménisques, convergents ou divergents. Le calcul montre également que la correction n'est possible qu'entre + 8 dioptries et – 25 dioptries, ce qui recouvre une très large gamme de lunettes.

Il subsiste toutefois de la courbure de champ, qui oblige l'œil à accommoder en vision oblique, aussi les opticiens adoptent-ils en général une correction hybride.

Notons que l'emploi de ménisques est signalé à Paris dès 1645, mais les premières réalisations sont dues à Wollaston en 1804, qui les fit tailler par le célèbre opticien londonien Dollond. La difficulté de réalisation, par rapport aux verres biconcaves ou biconvexes, les fit disparaître jusqu'à ce qu'Ostwald les redécouvre en 1898 et que Tscherning effectue en 1904 le calcul complet de la correction de l'astigmatisme oblique, retrouvant ainsi les résultats de Wollaston et ceux d'Ostwald.

Les ménisques sont à l'heure actuelle d'emploi universel pour les amétropies sphériques : myopie et hyperopie.

La presbytie pose un problème particulier, surtout lorsqu'elle est accompagnée d'une amétropie, problème psychologique plutôt que technique. Le presbyte doit en effet porter des lunettes différentes selon qu'il souhaite observer un objet proche ou un objet éloigné. Cette contrainte est quelquefois légère, mais le plus souvent très gênante, par exemple pour l'auteur de ces lignes, dont le regard « saute » constamment des notes de travail à l'écran de l'ordinateur.

Diverses solutions ont été proposées, qui reviennent toutes à affecter différentes zones d'un verre composite à différents usages. En principe, la partie supérieure du verre sert à la vision des objets éloignés, la partie inférieure à celle des objets proches.

Le cas le plus simple est celui d'un presbyte par ailleurs emmétrope, qui peut utiliser des demi-lunettes. Une autre solution communément adoptée est le verre bifocal, imaginé par Benjamin Franklin en 1760. Aucune des nombreuses solutions imaginées au fil du temps, n'a permis d'éliminer simultanément les défauts de ces verres : présence d'une ligne de démarcation peu esthétique et saut d'image lorsque le rayon visuel franchit cette ligne.

Mis au point en 1959 par la société française Essilor, les verres dits progressifs suppriment la ligne de démarcation et le saut d'image correspondant. Ils présentent toutefois d'autres inconvénients : l'une au moins des surfaces étant par essence non sphérique, il apparaît un astigmatisme prononcé.

Pour que cet astigmatisme disparaisse, il faudrait que les courbures aient même valeur en chaque point dans les plans horizontal et vertical. Or la sphère est la seule surface à jouir de cette propriété... La solution communément adoptée de nos jours est de réaliser la surface de façon que l'égalité des courbures soit réalisée en tous les points du plan de symétrie vertical et à admettre un astigmatisme de plus en plus fort au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce plan.

Il en résulte que l'image n'est bonne qu'au milieu et devient floue sur les bords. Cet effet est peu prononcé pour la vision de loin, mais très marqué pour la vision de près et oblige le porteur de lunettes à tourner sans arrêt la tête, ne serait-ce que pour lire un livre. Un autre inconvénient est d'obliger à baisser la tête pour permettre la vision éloignée à ses pieds, par exemple pour descendre un escalier.

L'aphakie est corrigée comme une très forte hyperopie, de l'ordre de 12 à 15 dioptries. Le calcul de Tscherning montre qu'il n'est pas possible d'annuler complètement l'astigmatisme oblique pour de telles puissances. Il y a plus grave : pour des raisons de poids et de confort, les verres pour aphaques ont un diamètre réduit, diminuant fortement, quand ils ne la suppriment pas, la vision latérale. Or c'est celle-ci qui prévient de l'approche d'un obstacle ou d'un danger comme l'arrivée d'une voiture lors de la traversée d'une rue. Pour cette raison, la correction de l'aphakie est de plus en plus souvent réalisée par l'introduction chirurgicale d'un cristallin artificiel. Cette solution rétablit la vision périphérique, mais pas encore l'accommodation qui ne requiert toutefois que des verres de faible puissance, comme ceux des presbytes « normaux ».

ASTIGMATISME

L'astigmatisme a pour origine un défaut de

CONFÉRENCE

symétrie de la cornée et du cristallin. L'œil présente alors deux méridiens principaux perpendiculaires, le plus souvent horizontal et vertical associés à deux convergences différentes, l'une maximale, l'autre minimale.

L'image d'un point lumineux n'est jamais un point, celle d'une droite est floue, et surtout il est impossible de voir nettement et ensemble deux droites perpendiculaires.

L'astigmatisme est corrigé comme une double amétropie, en faisant coïncider dans chaque méridien principal le foyer image du verre correcteur avec le remotum correspondant. Pour que la correction soit satisfaisante, l'astigmatisme du verre doit être indépendant de la direction d'observation. Il s'agit ici d'une généralisation de la condition de Tscherning déjà indiquée à propos des amétropies sphériques.

Les verres correcteurs possèdent une face sphérique et une face non sphérique, dont les sections principales ont la même orientation que celles de l'œil. Cette face est soit cylindrique soit torique. Les verres sphéro-cylindriques ont l'inconvénient de ne pas permettre une bonne correction de l'astigmatisme oblique aussi leur préfère-t-on les verres sphéro-toriques.

CONCLUSION : ET DEMAIN ?

Nous avons rapidement décrit les principaux défauts de la vision et leur correction à l'aide de lunettes. Inventée il y a sept siècles

par d'anonymes artisans, elles ont connu un succès mondial : c'est par centaines de millions que sont fabriqués et vendus les verres correcteurs, et plus nombreux encore sont les simples verres protecteurs, surtout les lunettes de soleil.

Les lunettes, malgré tous les progrès des opticiens, présentent encore des défauts difficiles à éliminer : leur fragilité, malgré l'adoption quasi-universelle de matières synthétiques transparentes, et l'inconfort inhérent à leur port, inconfort tant physique que psychologique.

A l'heure actuelle, les recherches s'orientent dans deux directions : remplacer les lunettes lourdes et fragiles par des lentilles cornéennes, plus communément appelées « verres de contact » d'une part ; rectifier la cornée et – pourquoi pas – le cristallin par la chirurgie, d'autre part.

La première idée des verres de contact est attribuée à Léonard de Vinci mais plus probablement due à Herschel (1827). Ils n'ont toutefois été réalisés qu'à la fin du XIX^e siècle par Fick et Müller. Les premiers verres de contact s'appuyaient sur la sclérotique (le « blanc des yeux ») et de ce fait entraînaient une gêne à plus ou moins long terme. En 1945 sont inventées aux USA les lentilles cornéennes qui s'appuient sur la cornée et sont mieux supportées.

Leur rôle est de modifier la courbure de la cornée, les indices de réfraction du verre ou

de la résine synthétique étant très voisins de ceux des milieux transparents de l'œil.

De cette constatation est née l'idée d'agir directement sur la cornée pour en « rectifier » la courbure et soigner ainsi définitivement les amétropies, seule la presbytie n'étant – et pour cause – pas justiciable de cette technique.

L'idée a été lancée par un chirurgien soviétique, le docteur Flyodorov, il y a une dizaine d'années. Il proposait d'entailler la cornée et d'en modifier ainsi la courbure. La méthode qui semble à l'heure actuelle la plus prometteuse est la microchirurgie au laser : un mince faisceau laser léger érode la cornée et permet de lui donner la courbure convenable.

Ces procédés n'ont toutefois pas dépassé le stade de l'expérimentation, et il faudra sans doute attendre quelque temps pour savoir qu'ils sont viables.

Nous terminerons par une anecdote, dont nous nous garderons bien de tirer une quelconque morale : la directrice d'une galerie de tableaux, fortement myope, s'était toujours refusée à porter des lunettes. A force d'insistance, son entourage la convainquit de faire l'essai de lentilles cornéennes. Quelque temps après, elle les jeta, car elle ne supportait ni la vue de ses toiles, ni celle de ses clients, un certain flou lui étant nécessaire pour tolérer son environnement.

(Figure 1)



Besicles à branches articulées dits clouants. Gravure de 1493.

(Figure 2)



Besicles attachés à la coiffe de la fileuse. Gravure du XVI^e siècle.

Figure 3)

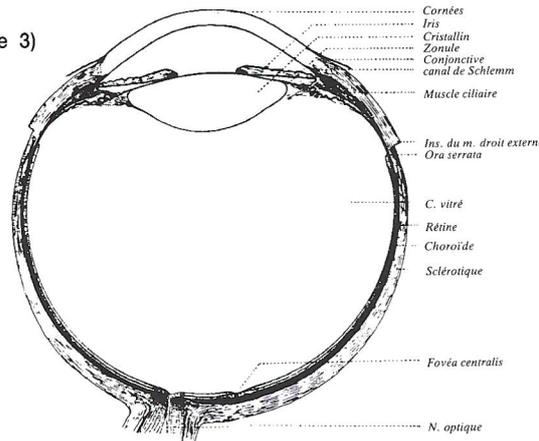


Schéma anatomique de l'œil.

(Figure 4)

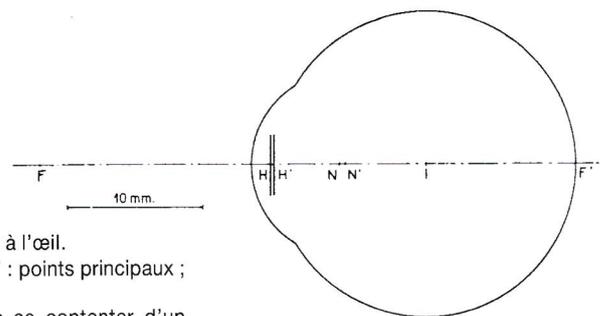


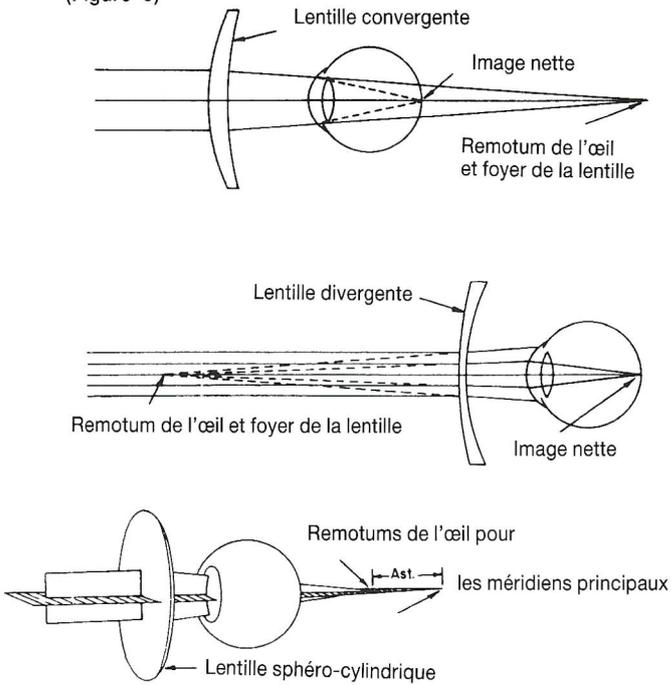
Schéma optique équivalent à l'œil.
 FF' : foyers principaux ; HH' : points principaux ;
 NN' : points nodaux.
 Il est souvent possible de se contenter d'un schéma plus simple, le dioptré de Listing.

Puissance de l'œil moyen : 58 dioptries

Position des éléments cardinaux (le pôle antérieur de la cornée est pris comme origine des abscisses; le sens positif est celui de la lumière).

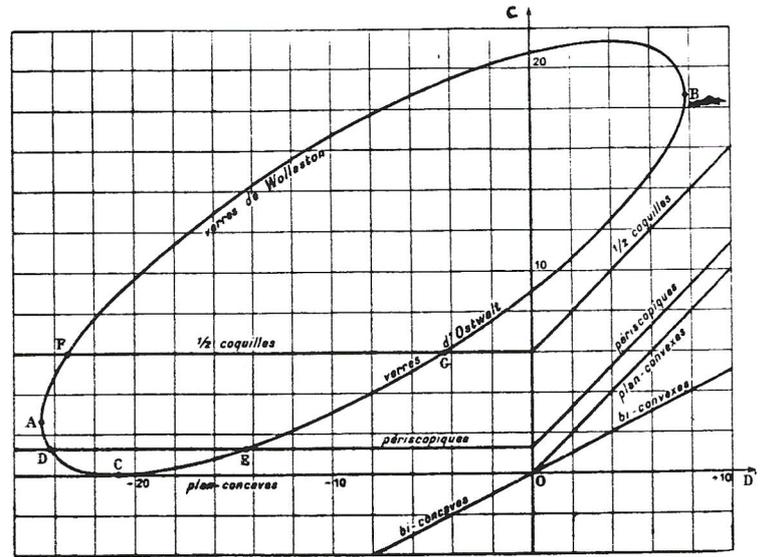
- Foyer objet : - 16 mm.
- Point principal objet : + 1,35 mm.
- Point modal objet : + 6,5 mm.
- Distance focale antérieure : - 17,3 mm.
- Foyer image : + 24 mm.
- Point principal image : + 1,60 mm.
- Point modal image : + 6,9 mm.
- Distance focale postérieure : 22,4 mm.

(Figure 5)



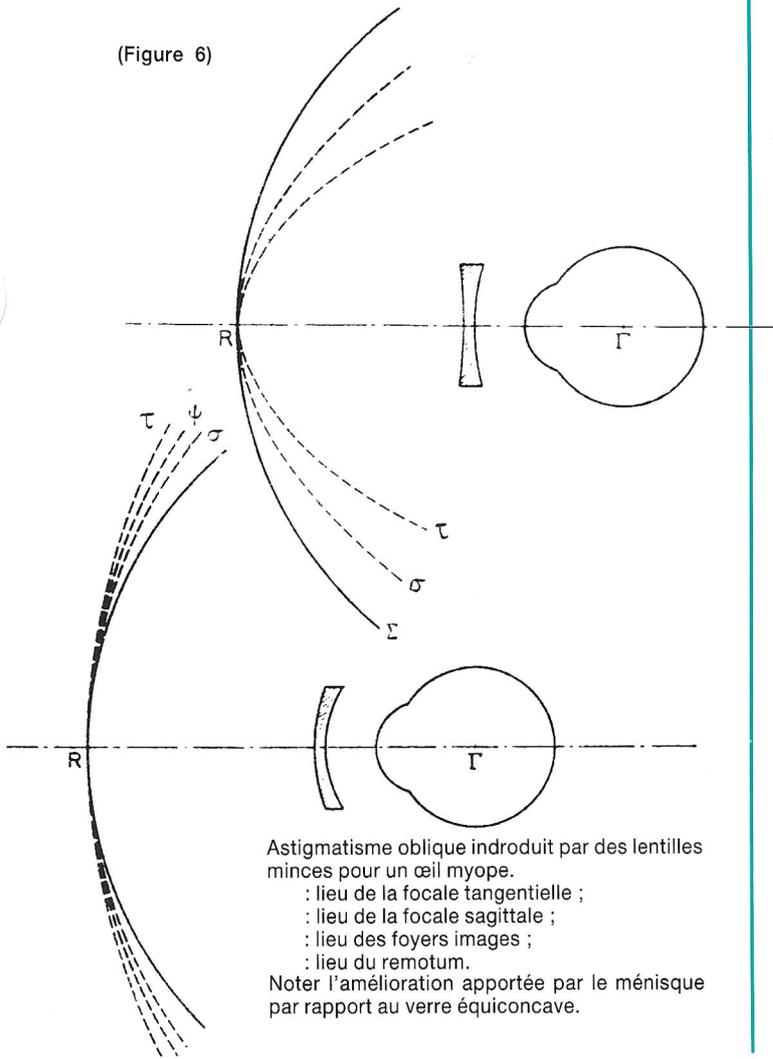
Correction de l'hyperopie, de la myopie et de l'astigmatisme.

(Figure 7)



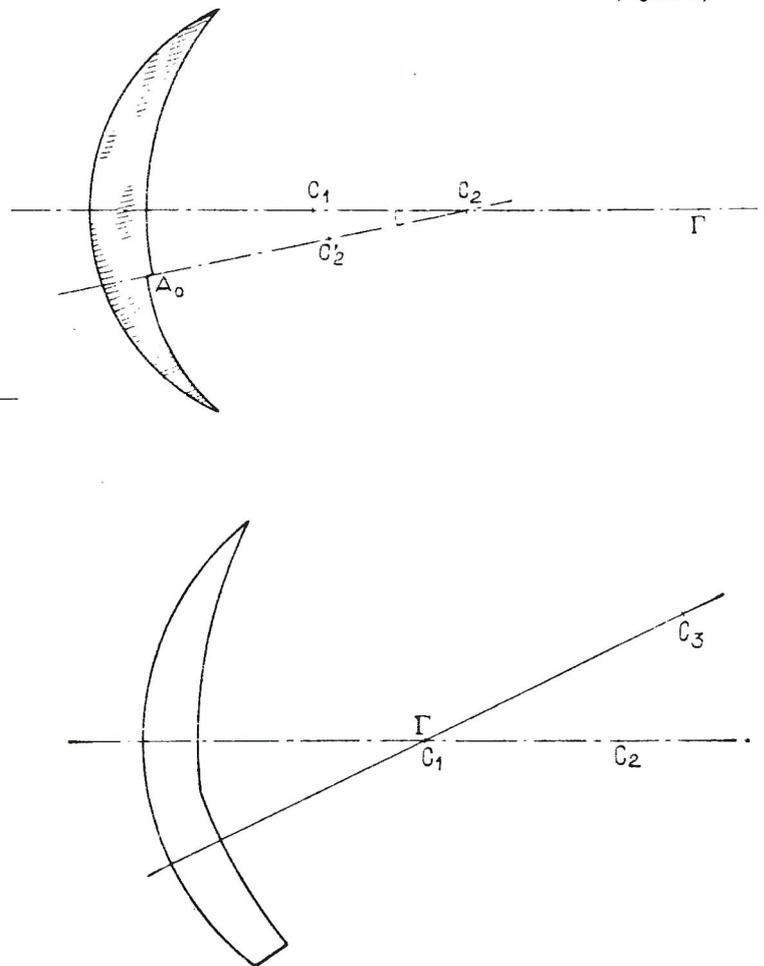
Ellipse de Tschering.

(Figure 6)



Astigmatisme oblique introduit par des lentilles minces pour un œil myope.
 : lieu de la focale tangentielle ;
 : lieu de la focale sagittale ;
 : lieu des foyers images ;
 : lieu du remotum.
 Noter l'amélioration apportée par le ménisque par rapport au verre équiconcave.

(Figure 8)



Exemples de verres bifocaux.

LA RECHERCHE EN AUVERGNE

Le laboratoire de Physique des Milieux Condensés de l'Université Blaise-Pascal

Le public est en général mal informé des recherches qui sont menées dans nos laboratoires. Les chercheurs n'ont évidemment pas pour vocation première de vanter leurs mérites dans les médias. Très absorbés par leurs activités, ils n'éprouvent pas toujours le besoin d'expliquer leurs objectifs et de présenter le résultat de leurs travaux.

Aussi nous avons pensé que l'ADASTA, bien implantée dans les milieux scientifique et technique, était en mesure de palier cette carence, du moins partiellement.

Dans ce numéro nous laissons la parole au laboratoire de Physique des Milieux Condensés, dirigé par le Pr. Robert CADORET.

Depuis 1982, année de sa création, le Laboratoire de Physique des Milieux Condensés (LPMC), laboratoire universitaire de physique fondamentale associé au CNRS met son potentiel de recherche au service de l'étude de matériaux d'intérêt industriel.

Le laboratoire est composé de quatre équipes, trois d'entre elles se consacrent aux semi conducteurs III-V, et la quatrième aux cristaux de chlorure et iodure mercurique utilisés comme capteurs de rayonnements.

LES SEMI CONDUCTEURS III-V, UNE VOIE VERS L'ELECTRONIQUE RAPIDE

Les semi conducteurs III-V sont formés, à proportions égales, d'éléments chimiques de la colonne III de la classification périodique comme l'indium (In), le gallium (Ga) et d'éléments de la colonne V tels que l'arsenic (As), le phosphore (P) ou l'antimoine (Sb).

La mobilité des électrons est jusqu'à huit fois plus grande dans les matériaux III-V que dans le silicium ou le germanium. Ces composés semi conducteurs sont donc des candidats de choix pour la fabrication de composants utiles à l'électronique rapide. Cet intérêt industriel justifie les efforts énormes déployés par les laboratoires pour parvenir à la maîtrise technique de l'élaboration de ces matériaux.

Un nouveau défi est maintenant lancé aux équipes de recherche : réaliser des empilements de couches très fines de matériaux semi conducteurs de compositions différentes pour permettre une miniaturisation de plus en plus poussée des composants. Les travaux s'orientent dans de multiples directions, compte tenu des diverses méthodes de croissance utilisables et des nombreux composés à étudier. Dans tous les cas, ce domaine de recherche requiert des appareils

très spécifiques et performants, tant pour la fabrication que la caractérisation des matériaux et donc la collaboration de plusieurs équipes ou laboratoires.

Participant à cette étape déterminante vers l'électronique de demain, le LPMC coordonne un programme financé par la C.E.E. (ESPRIT BASIC RESEARCH).

Neuf laboratoires européens situés en Grande-Bretagne (Cardiff), en Espagne (Barcelone et Madrid), en Crète (Héraklion) et en France (Lyon, Lille et Clermont-Ferrand) collaborent. Le programme prévoit la réalisation d'empilements de couches minces à partir d'indium, gallium, arsenic et phosphore. L'épaisseur de certaines couches ne devra pas dépasser quelques nanomètres* et les changements de composition d'une couche à l'autre devront être très abrupts. La finalité du programme est la mise en œuvre de dispositifs-test (sortes de prototypes) pour vérifier que les matériaux ont les performances électroniques attendues.

La part de Clermont-Ferrand dans ce travail, outre la coordination du projet, est la fabrication des couches. L'équipe «**Croissance des composés III-V par transport chimique en phase vapeur**» assure ce travail en collaboration avec deux autres équipes du LPMC. «**Spectroscopie des solides**» et «**Surfaces et interfaces des semi conducteurs III-V**» et le Laboratoire d'Electronique qui consacrent une partie de leurs activités à la caractérisation des couches obtenues.

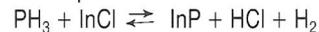
LA CROISSANCE DES SEMI CONDUCTEURS III-V.

La méthode de croissance utilisée au laboratoire est l'épitaxie en phase vapeur par la méthode aux hydrures. Le mot épitaxie, d'étymologie grecque, introduit par L. Royer en 1928 signifie «arrangement sur» et désigne la

croissance orientée d'un cristal sur un autre cristal (substrat) de sorte que certaines directions de symétrie soient communes aux deux cristaux. Les substrats utilisés au laboratoire sont des plaquettes découpées dans des lingots monocristallins de InP. Tous les semi conducteurs III-V ont une structure cristalline cubique de type Blende, ils diffèrent par le paramètre de maille. Deux types d'épitaxie sont à considérer, l'homoépitaxie et l'hétéroépitaxie.

L'homoépitaxie concerne la croissance sur le substrat d'un cristal de même composition (InP sur InP). Le plus souvent, la couche déposée contient une impureté en quantité définie très faible (dopage) qui sans altérer la structure cristalline permet de modifier les propriétés électroniques du matériau. Si sur le substrat est déposé un cristal de nature différente (InAs sur InP), il s'agit d'hétéroépitaxie. Les difficultés sont plus grandes quand les deux cristaux ont des paramètres de mailles différents ce qui induit des distorsions dans la couche épitaxiée. Plus cette couche est épaisse, plus l'énergie de contrainte qu'elle doit supporter est grande ; si cette énergie devient trop grande, il y aura des ruptures dans l'arrangement parfaitement périodique des positions des atomes de la couche (dislocations). La présence des dislocations est à éviter le plus possible car elles agissent sur le déplacement des électrons comme des pièges et nuisent aux propriétés électroniques du matériau.

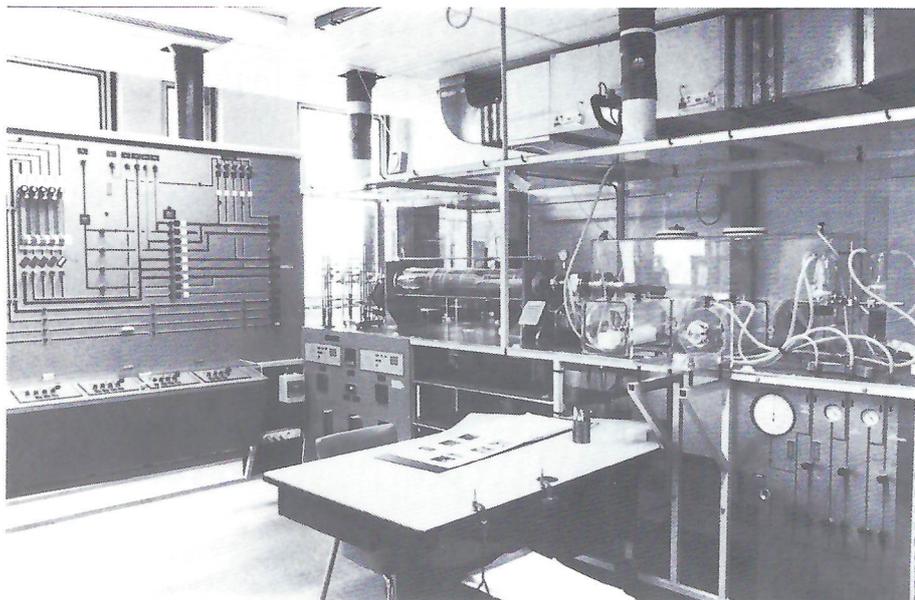
Il existe plusieurs méthodes pour apporter sur la surface du substrat les éléments chimiques nécessaires à l'épitaxie de la couche. Dans la méthode aux hydrures utilisée au laboratoire, les éléments III et V sont les constituants de molécules gazeuses, des chlorures d'indium InCl, des chlorures de gallium GaCl, de l'arsine et de la phosphine qui se fixent par une réaction chimique sur la surface du substrat. Par exemple, la réaction globale de dépôt de InP est



Les paramètres qui régissent l'épaisseur et la composition de la couche sont multiples.

Le laboratoire de Physique des Milieux Condensés (LPMC) est placé sous la responsabilité du Professeur CADORET et de Madame VASSON. Il comprend 12 enseignants chercheurs, un chercheur du CNRS, 2 ingénieurs et 9 étudiants qui préparent leur thèse de doctorat ès sciences.

* Le nanomètre vaut un milliardième de mm.



Equipe croissance.

Citons quelques uns d'entre eux : la température, l'orientation cristallographique du substrat, les proportions et le débit du mélange gazeux qui passe au-dessus du substrat. Pour contrôler une épaisseur épitaxiée au nanomètre près, une connaissance empirique est très insuffisante. Il a donc été nécessaire de déterminer les mécanismes élémentaires que recouvre la réaction globale précédente. La modélisation de la vitesse de dépôt a été obtenue en appliquant les théories de la cinétique chimique et de la physique statistique aux mécanismes élémentaires, et de la mécanique des fluides aux flux gazeux. Pour ces études, deux réacteurs d'épitaxie ont été successivement conçus, construits et modifiés depuis la création du laboratoire. Modélisation des processus et expériences sont sans cesse confrontés.

Aujourd'hui, les études sur les vitesses de croissance sont directement appliquées à la définition d'une procédure expérimentale pour réaliser les empilements de couches minces prévus par le contrat ESPRIT.

De nouvelles améliorations ont dû être apportées au réacteur, comme la commande automatisée des manœuvres des vannes qui règlent les flux gazeux. Une collaboration étroite avec les équipes de caractérisation a permis d'optimiser la procédure expérimentale et d'insérer avec un changement de composition très abrupt, entre deux couches de InP, une couche de InAs dont l'épaisseur est la plus fine réalisée au monde par cette méthode de croissance.

Les échantillons fournis par l'équipe de croissance servent de support expérimental à deux autres équipes du LPMC, spécialisées, l'une en spectroscopie, l'autre en étude des surfaces. Nous présentons leur activité dans le paragraphe suivant.

LES ETUDES DE PHYSIQUE FONDAMENTALE SUR LES SEMI CONDUCTEURS

L'équipe « spectroscopie des solides » procède à une investigation des niveaux d'énergie en analysant la réponse de l'échantillon sollicité par une onde électromagnétique.

Lorsqu'une telle onde est envoyée sur un solide, si sa fréquence ν , donc son énergie ($E = h \nu$) correspond à une différence d'énergie entre deux niveaux du solide, elle provoquera une réponse de l'échantillon. Cette réponse, suivant la fréquence de l'onde incidente peut être une onde lumineuse ou photon, une onde de déformation élastique ou phonon provoquant une élévation de température. La spécificité du laboratoire réside dans la mise en œuvre de méthodes d'analyse originales : la détection thermique et la détection bolométrique.

La détection thermique est la mesure de l'élévation de température de l'échantillon effectuée avec un thermomètre sensible à 10^{-5} K !

La détection bolométrique utilise un récepteur thermique de rayonnement qui transforme le rayonnement à analyser en chaleur qui est ensuite mesurée. L'originalité du laboratoire consiste à utiliser ce type de détection pour une étude en transmission d'un rayonnement hyperfréquence. Les signaux détectés étant de meilleure qualité et les thermomètres et bolomètres plus sensibles à basse température, toutes les expériences ont lieu au voisinage de 4 K, il est prévu d'ailleurs d'atteindre 0,3 K à brève échéance.

Suivant les domaines de fréquence des ondes incidentes et des réponses, les techniques de spectroscopie portent des noms différents.

La photoluminescence est du domaine des

ondes lumineuses. Au laboratoire, elle a permis le suivi des expériences de croissance car elle est directement sensible au déplacement des niveaux d'énergie d'une couche mince de InAs entre deux couches InP. Le déplacement est dû à l'intensité de la contrainte, à l'épaisseur de la couche de InAs et à la qualité des interfaces. Plus qu'un simple moyen de caractérisation, la photoluminescence est la technique fondamentale d'étude des niveaux d'énergie dans les semi conducteurs.

La R.P.E. (Résonance Paramagnétique Electronique) utilise le domaine des hyperfréquences. L'échantillon est en plus soumis à un champ magnétique statique qui sépare des niveaux d'énergie confondus en champ nul et permet ainsi leur étude. Elle sert à étudier les impuretés dont la présence crée des niveaux d'énergie supplémentaires dans le solide. Ces niveaux sont caractéristiques de la nature chimique de l'impureté. L'équipe utilise aussi la spectrométrie infrarouge pour l'étude de ces défauts. Une modélisation des spectres dus à ces défauts est entreprise.

Les travaux de l'équipe « Spectroscopie des solides » qui s'intéresse aux phénomènes en profondeur sont complémentaires de ceux de l'équipe « Surfaces et interfaces des semi conducteurs III-V ».

Cette dernière s'attache à bien connaître et à contrôler l'état de surface des échantillons, étape essentielle dans le passage du matériau au composant. Lorsque l'empilement de couches quitte le réacteur de croissance, deux problèmes se posent pour son utilisation comme dispositif test. Du fait de la miniaturisation et des performances recherchées, il faut pouvoir réaliser des contacts métalliques très petits et qui collent parfaitement à l'échantillon. La surface doit donc être exempte de toute contamination et il faut rechercher le métal qui permettra le collage optimum. La solution de ces deux problèmes pratiques nécessite en fait une connaissance fondamentale très poussée de la surface des

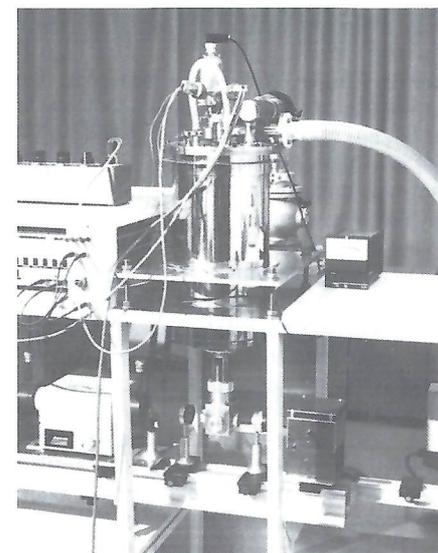


Photo équipe : « Spectroscopie des solides ».

échantillons. Après nettoyage par un bombardement d'ions d'argon (Ar^+), la surface de InP est recouverte d'une couche d'antimoine (Sb) qui la protège de toute contamination atmosphérique. Cette protection peut être enlevée par un simple chauffage de l'échantillon. Une surface propre est ainsi libérée sur laquelle les contacts métalliques sont assurés par un mince dépôt d'or. Les tests électriques sont réalisés en collaboration avec le Laboratoire d'Électronique.

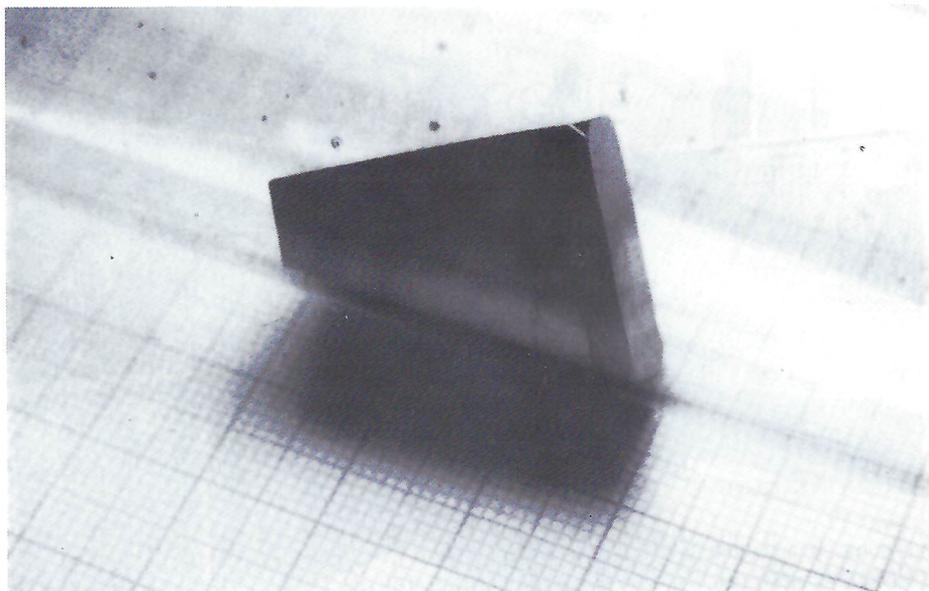
Toutes ces expériences sont effectuées dans des bâtis à ultra vide (10^{-7} Pa). Plusieurs types de spectromètres équipent ces bâtis pour le suivi des expériences. Le bombardement ionique et le chauffage arrachent à la surface, des atomes qui sont identifiés avec un spectrographe de masse. Un faisceau d'électrons frappant l'échantillon interagit avec la surface et donne naissance à un faisceau diffusé qui est analysé. Suivant l'énergie du faisceau incident, les électrons subissent une réflexion élastique ou inélastique ou arrachent d'autres électrons aux couches superficielles (électrons Auger). L'analyse angulaire et énergétique du faisceau renvoyé par l'échantillon et la comparaison des spectres obtenus avec des modèles élaborés par l'équipe permettent l'interprétation quantitative des résultats expérimentaux et par exemple de préciser les mécanismes du dépôt d'antimoine. L'étude théorique s'est ensuite étendue à la modélisation informatique de la diffusion angulaire des électrons pour différents matériaux. Ces programmes simulent l'envoi d'un million d'électrons sur la surface et en une heure trente de calcul permettent de connaître la répartition angulaire des électrons diffusés.

La collaboration entre les trois équipes du LPMC étendue aux autres laboratoires partenaires du contrat ESPRIT a porté ses fruits et se poursuivra dans le cadre d'autres projets de recherche pour l'électronique nouvelle.

DES CRISTAUX DANS L'ESPACE

Les travaux de la quatrième équipe citée «**Croissance en microgravité**» sont sans doute plus connus du grand public que ceux des trois autres en raison d'une collaboration avec la NASA. Pourtant, comme ceux des autres équipes ses membres «font de la recherche» sur des matériaux d'intérêt industriel et l'aspect spectaculaire ne doit pas cacher la complexité du travail de physique fondamentale effectué.

Leur objectif est de rechercher l'effet de la pesanteur sur la croissance en phase vapeur de monocristaux de HgI_2 ou $HgCl_2$. Pour cela, des expériences sont effectuées en tubes fermés pour contrôler la température et la composition du mélange gazeux, sur Terre et dans la navette spatiale en l'absence de pesanteur. Les premières expériences auxquelles l'équipe a participé sur les navettes spatiales I et III en 1983 et 1985 ont montré que la gravité influe surtout sur les gradients de concentration au voisinage de la surface du cristal en formation.



Cristal d'iodure mercurique utilisé comme détecteur de rayonnement γ (expériences en microgravité en collaboration avec la NASA).

La contribution de Clermont-Ferrand consiste d'une part à préparer des ampoules contenant des germes purs, parfaitement monocristallins et un four de croissance qui seront embarqués sur la navette IML1 en 1991, d'autre part à prévoir la carte thermique dans l'ampoule, les vitesses de croissance et étudier les flux gazeux dans les conditions du vol. Comme pour la croissance des semi-conducteurs III-V, les modélisations des vitesses de croissance utilisent les théories

statistiques et cinétiques et la mécanique des fluides.

À l'avenir, les équipes du LPMC comptent resserrer encore les liens qui les unissent et développer des collaborations avec d'autres laboratoires de l'Université Blaise-Pascal. Une entente locale solide permettrait d'envisager une participation plus importante à des programmes internationaux.

DEUX MÉDAILLES DE BRONZE DU CNRS AU LABORATOIRE DE PHYSIQUE CORPUSCULAIRE DE L'UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL

Le Laboratoire de Physique Corpusculaire de l'Université Blaise-Pascal vient de se distinguer à nouveau grâce à deux chercheurs qui ont obtenu la médaille de bronze du CNRS au titre de l'année 1990.

Il s'agit de M^{lle} Hélène FONVIELLE et de M. Dominique PALLIN. Un beau succès pour le Laboratoire de Physique Corpusculaire dirigé par le Pr. J.-C. MONTRET. Toutes nos félicitations aux jeunes lauréats.

Section 01 - Physique Nucléaire

M^{lle} H. FONVIELLE

Agée de 34 ans, M^{lle} H. FONVIELLE a effectué ses études à l'Université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand.

Maître ès Sciences en 1979, elle est titulaire d'un Diplôme d'Études Approfondies «Physique de l'Énergie» de l'Université Paris 7 et du DEA de Physique de l'Université de Clermont.

M^{lle} H. FONVIELLE soutient sa thèse de 3^e cycle en 1984 sur la faisabilité d'une expérience d'électroproduction inverse au seuil auprès de l'Accélérateur Linéaire de Saclay. Cette expérience deviendra le sujet de sa thèse de Doctorat d'État qu'elle soutient en 1989 avec les félicitations du Jury.

Spécialiste de la physique nucléaire avec la sonde électromagnétique, M^{lle} H. FONVIELLE prend, depuis cette date, une part importante à l'activité de l'équipe de recherche travaillant sur ce sujet. Sa compétence et son travail intensif, en font un élément majeur du groupe français qui prépare la future machine européenne à électrons pour la physique nucléaire.

Section 02 - Physique Corpusculaire

M. Dominique PALLIN

Agé de 32 ans, M. Dominique PALLIN a effectué ses études à l'Université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand.

Maître ès Sciences en 1982, Diplômé d'Études Approfondies en 1983, il soutient sa thèse de troisième cycle en 1985 avec les Félicitations du Jury.

Le sujet de sa thèse portait sur les désintégrations baryoniques du J/ψ et la mesure du spin du gluon. Ce travail fut le fruit d'une expérience en collaboration avec les laboratoires d'Orsay, Padoue et Rome, dans laquelle D. PALLIN joua un rôle déterminant pour l'analyse des données.

Depuis 1985, D. PALLIN effectue son activité de recherche au sein de la collaboration internationale ALEPH, dont le détecteur est installé auprès du collisionneur électron-positron LEP au CERN, à Genève. D. PALLIN, avec l'équipe clermontoise à laquelle il appartient, a été et est impliqué dans la conception et dans la réalisation d'un sous détecteur mais aussi à l'acquisition, au retraitement et à l'analyse des événements emmagasinés depuis le démarrage de l'expérience en juillet 89.

Dans chacune de ses activités, D. PALLIN a fait la preuve d'une grande compétence, reconnue par l'ensemble de ses collègues.

CONFÉRENCE - VISITE

SORTIES DE L'ADASTA*

COMPTE-RENDU DU VOYAGE A HEIDELBERG (R.F.A.) LES 17-18-19 OCTOBRE 1990

Ce voyage d'études, organisé conjointement par la section AUVERGNE de la Société Française de Physique, la Direction Régionale d'Electricité de France et l'ADASTA, a connu un franc succès.

Favorisé par des conditions financières avantageuses, grâce à l'appui d'EDF et de plusieurs firmes de matériel scientifique (Le Croy, Bruker) et l'aide de Laboratoires de Recherche des Universités, il a permis aux participants de découvrir l'Alsace et une partie de la Rhénanie sous un ciel ensoleillé, qui faisait ressortir l'admirable palette des teintes automnales.

Le premier jour fut consacré à la visite de la centrale nucléaire de FESSENHEIM, composée de deux tranches de 900 MW, en service depuis 1977. Sa production annuelle (10 à 12 milliards de kWh) représente 1,2 fois la consommation alsacienne. Mais actuellement, une tranche est en révision décennale, et la centrale n'assure pas les besoins régionaux. Notons toutefois qu'il existe sur le Rhin un chapelet de barrages hydrauliques producteurs d'électricité (Kembs, Ottmarsheim, Fessenheim, Vogelgrün, Marckolsheim, Rhinau, Gerstheim, Strasbourg, Gamsbheim et Iffezheim) qui assurent bien au-delà les besoins locaux. De l'électricité est vendue en Allemagne et en Suisse.

La particularité de la centrale de Fessenheim est de condenser la vapeur issue du groupe turbo-alternateur dans des tubes refroidis à l'eau, prélevée dans le canal d'Alsace. Le débit de ce dernier est suffisant, en toute saison, et le réchauffement de l'eau est minime (inférieur à 1°C en moyenne). On a ainsi pu éviter les tours de condensation aériennes, encombrantes et, de plus, génératrices de panaches de vapeur d'eau, gênants dans une région naturellement propice à la formation de brouillard.

Après la visite détaillée de la tranche à l'arrêt (ce qui permet en particulier de voir l'alternateur en partie démonté) nous traversâmes du Sud au Nord la plaine d'Alsace, notre gîte se trouvant à Wissembourg, à la frontière allemande.

Le lendemain fut consacré au voyage en Allemagne. De Wissembourg à Heidelberg, par Karlsruhe, nous avons traversé une région harmonieusement partagée entre une forte activité industrielle (papeterie, matériel électrique ou électronique...) autour de Karlsruhe, et une zone forestière et agricole près de Heidelberg. Le but du voyage était la visite du Max-Planck Institut de cette ville (l'équivalent du CNRS français), qui se consacre à des recherches orientées vers la physique nucléaire, et en particulier l'étude des faisceaux d'ions lourds ; sous la conduite des professeurs SCHMIDT et VOLK, nous avons pu admirer des accélérateurs et des détecteurs spécifiques, mis au point et construits à l'Institut. L'après-midi fut consacré à une visite de la vieille ville universitaire, la plus célèbre d'Allemagne.

De retour à Wissembourg, nous avons pu apprécier la production vinicole de l'Alsace du Nord, certes moins connue que sa sœur du Sud, mais qui, bénéficiant ces dernières années d'un enso-



lèvement tout à fait exceptionnel, a produit des vins blancs comparables aux vins de Moselle, du côté allemand.

Le troisième jour nous permit de visiter l'usine de la filiale française (SADIS) de la firme allemande BRUKER, qui se consacre à la production de spectromètres à résonance magnétique destinés à la Recherche en physique, chimie, biologie ou médecine.

Cette visite fort instructive nous a permis de constater le soin apporté à toutes les étapes de cette fabrication. Nous avons en particulier admiré

la minutie nécessaire au bobinage d'un électroaimant supraconducteur destiné au premier modèle commercialisé d'un équipement d'imagerie (IRM) pour applications médicales.

En fin de matinée, un tour rapide à travers les vieux quartiers de Wissembourg nous plongeait dans l'ambiance typique de l'Alsace traditionnelle, que dès le début de l'après-midi, nous dûmes quitter, à regret, pour entreprendre le voyage du retour.

L'expérience d'un voyage de plusieurs jours, avec passage de la frontière, avait été réussie, et nous la renouvellerons dès que possible.

* Projets de sorties pour le 1^{er} trimestre 1991 :

- a) Visite de la verrerie de Saint-Just sur Loire, le 27 mars.
- b) Visite de plusieurs Laboratoires de Recherche (CNRS, BRGM,...) à Orléans. Les 31 mai et 1^{er} juin (voir le minitel).

librairie
les Volcans
 d'auvergne

80. boulevard Gergovia

CLERMONT-FERRAND

COLLOQUE LES VOIES ROMAINES ET LEUR ENVIRONNEMENT

les 5, 6 et 7 juin 1991

à la Maison des Congrès de Clermont-Fd

Présenté dans le cadre de la Semaine des Arts Techniques et Cultures de l'Automobile et de la Route (SATCAR), ce colloque est organisé par le Centre d'Etudes et de Recherches d'Archéologie Aérienne (CERAA). Il se déroulera à la Maison des Congrès et de la Culture de Clermont-Fd. Le programme comprend :

- historique, tracé, cartographie des voies
- les objectifs visés par l'aménagement des voies
- le coût et économie des voies
- les utilisateurs
- l'ordre public et les règlements sur les voies antiques
- les voies romaines après les grandes invasions.

Naturellement les congressistes iront visiter les ruines du Temple de Mercure au sommet du Puy-de-Dôme ainsi que les fouilles (moins connues) de Vicus de Beauclair sur la voie antique Lyon-Saintes.

Pour tous renseignements s'adresser à :

CERAA, Square de la Jeune Résistance
Avenue des Paulines, 63000 CLERMONT-FD.

L'INSTITUT DU VIVANT A LA RECHERCHE D'UN SITE EN PROVINCE

Après l'Ecole Polytechnique (à Palaiseau), l'Ecole Normale Supérieure de Saint-Cloud (à Lyon) et quelques autres, l'Institut National Agronomique va devoir quitter Paris et son environnement prestigieux pour installer ses meubles en province. On profitera de l'occasion pour déménager l'Ecole Vétérinaire de Maisons Alfort, l'Ecole des industries Agro-alimentaires, l'Ecole d'Horticulture de Versailles et l'Ecole du Paysage. Le tout constituerait un «Institut des Sciences et Techniques du vivant».

Clermont-Ferrand a posé sa candidature pour accueillir cette nouvelle structure avec l'appui des autorités régionales et départementales. Il est vrai que notre région ne manque pas d'arguments à faire valoir, compte-tenu des activités concernées : groupes Limagrain, Delbard, Perrier (eau de Volvic et Compagnie fermière à Vichy), Rhône Poulenc (alimentation animale à Commeny) etc... sans oublier l'industrie de la viande et de la chimie (MSD Chibret, Roussel Uclaf).

Sur le plan scientifique, la recherche dans les universités, l'INRA et dans les entreprises privées est bien placée pour accueillir cette nouvelle structure.

Le choix, en définitive, sera politique mais le dossier auvergnat est solide.

UN SERVICE D'INFORMATION VOLCANOLOGIQUE PAR MINITEL ACCESSIBLE AU GRAND PUBLIC (3615 code VOLTEL)

VOLTEL, Association loi de 1901, créée en avril 1988, à l'initiative du Centre de Recherches Volcanologiques de Clermont-Ferrand, a pour but de diffuser des informations volcanologiques validées auprès du grand public, notamment par le canal du serveur minitel «VOLTEL».

Le serveur VOLTEL met à votre disposition 170 pages vidéotex d'informations validées sur les volcans du Monde, accessibles par menus arborescents, dont :

- un flash, en direct sur l'actualité,
- les futures manifestations scientifiques,
- les excursions, les voyages, les échanges,...
- les références documentaires sur les vidéos, les livres,

- l'histoire et l'activité des volcans français,
- l'activité des volcans du Monde, ceux observés par Argos,
- une messagerie télématique pour répondre à vos questions.

Son matériel télématique et informatique :

- Hébergement sur un IBM 3090, relié à un IBM 3081, serveur du Centre National Universitaire Sud de Calcul de Montpellier, et gestion documentaire des pages grâce au logiciel PAPA.

- un microordinateur, de type compatible PC, dédié aux tâches de mises-à-jour, équipé d'un modem permettant la liaison directe au serveur via le réseau téléphonique commuté et transpac.

UN NOUVEAU MICROSCOPE A BALAYAGE AU PÔLE TECHNOLOGIQUE CASIMIR

Depuis janvier 1991 un nouvel appareil d'observation est disponible au Pôle Technologique. En effet, après une étude de besoins au niveau industriel et universitaire, il est apparu judicieux de renouveler le microscope électronique à balayage du CRMP (Centre Régional de Mesures Physiques), implanté dans les locaux du bâtiment de zoologie sur le Campus Universitaire des Cézeaux. Cet appareil qui a rendu de nombreux services s'est avéré un peu limité en résolution sur certaines études spécifiques. Pour le CRMP, MM PIN, BOHATIER, JACQUET et M^{me} VESCHAMBRE, ont collaboré avec le Pôle Technologique pour l'établissement et le montage du dossier financier.

Le nouveau microscope est un Cambridge Stereoscan 360 digitalisé, à source tungstène, platine motorisée et détecteur d'élec-

trons rétrodiffusés. Il pourra travailler de 200 volts à 40 kV en gamme de tension et de 5 fois à 300.000 fois en grandissement. Ce MEB sera complété ultérieurement par un dispositif d'analyse RX en dispersion d'énergie et permettra d'adjoindre à l'imagerie une analyse élémentaire ponctuelle au point d'impact du faisceau.

Le domaine d'application de la microscopie électronique à balayage est très étendu : caractérisation de fractures, de cassures en métallurgie, examen de micro-soudures sur des composants électroniques, visualisation d'imprégnation de vernis, de colles sur des fibres textiles ou dans des matériaux composites, études de granulométrie, de porosité...

Les personnes intéressées par ce type d'imagerie peuvent prendre contact avec M^{me} A.M. MAFILLE à CASIMIR (Tél. 73 26 24 44).

3615

Code

VOLTEL

L'Actualité VOLcanologique sur miniTEL

24/24

UN SERVEUR MINITEL ADASTA 24h/24 : 73 40 76 58

L'information doit circuler de plus en plus vite. Une revue comme «Auvergne-Sciences», qui paraît tous les trois mois, et dont l'élaboration demande plusieurs semaines, n'est pas adaptée à la diffusion rapide de certaines informations : Conférences, visites d'entreprises ou de centres de recherche, stages, etc...

Compte tenu de l'importance croissante des activités de l'ADASTA, dans tous les domaines de la Culture Scientifique et Technique, nous avons décidé de créer un serveur minitel.

Cette réalisation, due à Gérard DÉPREUX et David ROMEUF, vous permettra de connaître très rapidement des détails sur nos activités. Vous y trouverez bientôt des données astronomiques et, bien sûr, le catalogue, constamment remis à jour, de notre Centre de Ressources Pédagogiques qui se développe constamment. Dès à présent, vous pouvez prendre connaissance du contenu des stages de formation, des visites et conférences ainsi que du programme complet de notre Université d'été (du 2 au 7 septembre 1991) consacrée cette année à «LA LUMIÈRE BLANCHE ET LA COULEUR».

Pour utiliser le minitel : composez le n° 73 40 76 58. Après 5 ou 6 coups de sonnerie, le microordinateur est opérationnel, ce dont vous serez averti par une tonalité aiguë. Appuyez alors sur la touche «connexion-fin» de votre minitel.

N'oubliez pas que vous bénéficiez du tarif avec modulation horaire, comme pour les communications usuelles.

CONFÉRENCE

«Données récentes sur le volcanisme de la Chaîne des Puys».

Cette conférence de notre ami Guy CAMUS, Maître de Conférence à l'Université Blaise-Pascal, permettra de faire le point des connaissances sur le Volcanisme de la Basse Auvergne.

Guy CAMUS, qui a consacré un grand nombre d'années à l'étude de ce sujet, est très certainement l'un des plus qualifiés pour nous en parler.

Grand Auditorium du C.R.D.P., rue d'Amboise
à Clermont-Ferrand, le mardi 16 avril à 18h00

EXPOSITION

Sculpture - Machine
au Musée F. Mandet à Riom

Deux jeunes artistes, J.-P. SAINT-ROCH et Pascal PROMPT, en s'inspirant du principe de la machine, ont créé des sculptures en bronze, en cuivre, en acier ou en pierre. Ces sculptures sont animées par des sources lumineuses en mouvement.

Placés dans le sillage de Tinguely, Calder ou Kowalski ces artistes apportent à la sculpture d'aujourd'hui leur touche personnelle empreinte de poésie.

Musée F. MANDET, 14, rue de l'Hôtel-de-Ville - 63200 RIOM
du 13 mars au 2 juin 1991 - Fermé le lundi et mardi
Tél. 73 38 18 53

EXPOSITIONS

L'ADASTA présentera deux expositions au Centre Municipal Pierre Laporte, à Clermont-Ferrand du 23 avril au 18 mai 1991 :

1. **LA DANSE DE L'UNIVERS** : exposition créée par le Palais de la Découverte. Cette exposition bénéficiera, sur le plan local, du concours du laboratoire de physique corpusculaire. Un double regard sur l'art et la physique de l'infiniment petit.

2. **IMAGES DE LA PHYSIQUE** : exposition créée par l'ADASTA à partir d'images choisies pour leurs qualités esthétiques :

«Jeux de lumière avec un laser, jeux d'interférences et synthèses de couleurs...».

Trois expériences et des audiovisuels accompagneront ces expositions.

L'ADASTA AU JOUR LE JOUR

Vous trouverez plus rapidement des informations ponctuelles sur nos activités : conférences, visites, expositions, animations diverses, dans *L'ADASTA au jour le jour*. Parution du n° 2, fin avril.

Monsieur Michel DEMAZURE

Nouveau Directeur du Palais de la Découverte

M. Michel DEMAZURE vient d'être nommé Directeur du Palais de la Découverte en remplacement à M. Etienne GUYON, nommé Directeur de l'Ecole Normale Supérieure de la rue d'Ulm.

M. Demazure, mathématicien, âgé de 53 ans, est ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure et Docteur ès Sciences. Il a été successivement attaché de recherches au CNRS de 1962 à 1964, enseignant à l'Université de Strasbourg (1964-1966), puis professeur à l'Université de Paris Sud Orsay (1966-1976).

M. Demazure exerçait depuis 1976 les fonctions de professeur de mathématiques à l'Ecole Polytechnique.

Il a d'autre part été président de la Société Mathématique de France en 1988 et membre du Comité National d'Évaluation de la recherche depuis 1989.



APPAREILS DE MESURES ÉLECTRONIQUES

P.B. MESURES

RÉPARATIONS - MAINTENANCE ÉTALONNAGE

Toutes marques

- ▶ CONTRÔLEURS - MULTIMÈTRES
- ▶ OSCILLOSCOPES
- ▶ ENREGISTREURS
- ▶ GÉNÉRATEURS BF
- ▶ ALIMENTATIONS
- ▶ APPAREILS DE LABORATOIRES

Distributeur **A.O.I.P. Mesures**

699, avenue de l'Europe, 63110 Beaumont - Tél. 73 27 61 31
S.A.V. agréé : AOIP Mesures - AVANTEC/BIOBLOCK SCIENTIFIC

**OPERATION
«RECREASCIENCES»**

L'ADASTA organise, avec l'aide du Ministère de la Recherche et de la Technologie (DIST), une opération destinée à sensibiliser les enfants à un thème scientifique (ou technique) de manière attrayante afin de les familiariser à la démarche scientifique.

L'ADASTA a proposé un ensemble d'actions, qui s'adressent aux jeunes de 8 à 11 ans, portant sur le thème de l'**image en optique** («du télescope au microscope»). Ce thème a été choisi pour les raisons suivantes :

- il concerne un vaste domaine des activités scientifiques et techniques que les enfants cotoient ou utilisent journellement.
- il donne lieu à des expériences spectaculaires qui excitent la curiosité.
- les documents pédagogiques sont relativement peu nombreux dans ce domaine.

L'opération se déroule en trois temps selon le schéma suivant :

- 1) Un premier temps (janvier-juin 1991) est consacré à l'organisation matérielle de l'opération : l'information auprès des maîtres qui ont accepté un rôle d'animateur, choix des sujets à traiter, des visites à effectuer, réunion d'une documentation, etc...
- 2) Au cours de la deuxième période, consacrée à l'animateur (année scolaire 1991-1992), les enfants participeront aux visites d'entreprises et de laboratoires, aux expositions et à la création de documents.
- 3) Les documents testés avec les élèves feront l'objet d'une élaboration définitive et seront mis à la disposition des enseignants et des Centres Culturels Scientifiques. Sont déjà prévus deux valises pédagogiques sur les images en optique, un logiciel sur la synthèse des couleurs et un film vidéo sur la décomposition de la lumière.

LES PETITS DÉBROUILLARDS

Depuis février 1986 s'est implantée en France une Association qui a pour but d'intéresser les enfants de 7 à 12 ans aux loisirs scientifiques. Le mouvement est parti du Québec ; il reprend des idées fort anciennes : la réalisation d'expériences faciles, amusantes (et inoffensives) qui permettent d'initier les membres du club au raisonnement scientifique.

Bien sûr, cela nécessite un encadrement des enfants ; c'est pourquoi des clubs «Petits débrouillards» ont été créés en plusieurs régions de France (Ile de France, Lorraine, Poitou-Charente, Bretagne...) au sein de Maisons de Jeunes ou de Centres «Jeunesse et Culture». Le Président National est M. Etienne GUYON, Directeur de l'Ecole Normale Supérieure.

Mais il est toujours difficile de trouver des animateurs ayant une formation scientifique suffisante qui permette de répondre correctement aux questions des enfants.

L'ADASTA se doit de participer à cette initiation scientifique des enfants sous forme ludique.

Nous avons constitué une équipe de personnes qualifiées, bénévoles, comprenant des professeurs et des ingénieurs, qui peuvent se charger d'encadrer un petit groupe d'enfants.

Une douzaine de séances pourront avoir lieu au cours de l'année dans un local du centre ville.

Les enfants pourront ensuite refaire chez eux des expériences simples ne demandant aucun autre matériel que celui qu'on peut trouver à la maison.

Exemple de manipulation :

Prendre une bouteille ; la remplir au 3/4 de vinaigre (d'alcool, il est moins cher) ; dans un petit ballon de baudruche, introduire une cuillerée environ de bicarbonate de soude ; glisser l'ouverture du ballon sur le goulot de la bouteille mais de façon que le ballon (avec son contenu) pende le long de la bouteille.

Ensuite soulevez le ballon verticalement de façon que le bicarbonate tombe dans le vinaigre.

*Devinez ce qui se passe...
Les enfants sont enthousiasmés.
Commentez et exploitez le résultat...*

Recette amusante

Comment un ballon de baudruche gonflé peut-il être traversé de part en part par une aiguille à tricoter (ou une pique en bois) sans éclater ?

Essayez...

Réponse dans le prochain numéro.

S. GÉLY
66, rue Beausoleil, 63000 Clermont-Fd

Nous remercions Madame Gély de bien vouloir prendre en charge cette nouvelle activité de l'ADASTA, qui permettra d'éveiller la curiosité des enfants. Nous souhaitons recevoir des suggestions, (et des offres de service pour l'encadrement !).

Pour les inscriptions aux séances, les parents doivent s'adresser à :

ADASTA
UFR Sciences
63177 AUBIERE CEDEX
Tél. (le matin) : 73 40 72 26

CONFÉRENCE : «LES CONFINS DE L'UNIVERS»

L'ADASTA et l'AAAA (Association des Astronomes Amateurs d'Auvergne) ont invité Madame COLLIN, Directeur de Recherche à l'Observatoire de Paris à venir à Clermont-Ferrand pour parler des «**Confins de l'Univers**». Madame COLLIN fera le point sur les connaissances et hypothèses sur ce sujet.

Conférence le 6 mai 1991 à 17 h 30 au grand auditorium du CRDP.

TROIS SCIENTIFIQUES CLERMONTOIS A L'HONNEUR

Trois chercheurs de l'Université Blaise-Pascal à Clermont-Ferrand ont reçu un prix de l'Académie des Sciences : il s'agit du Professeur Jean-Claude GRAMAIN pour ses travaux en photochimie, de Nicole BOYER pour ses travaux en botanique et Daniel VIELZEUF pour ses travaux en géologie.

Nous publierons prochainement un article détaillé sur les travaux de ces chercheurs.

**P.S.M.
COMPOSANTS**

- ▶ Composants électroniques professionnels
- ▶ Matériel et outillage
- ▶ Appareils de mesure
- ▶ Librairie technique

◆
**29, place du Changil
63000 CLERMONT-FERRAND
Tél. 7331 1376**