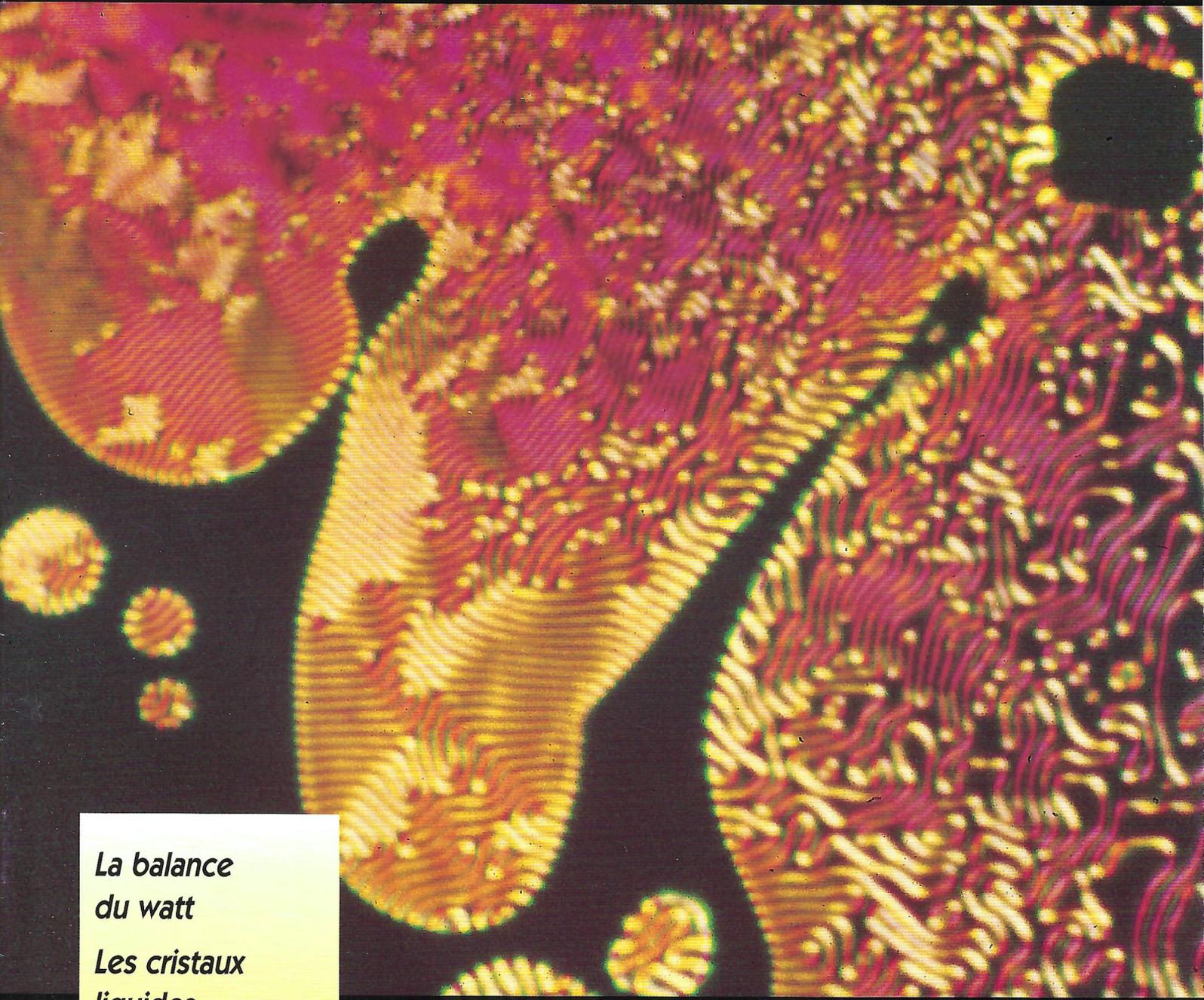


AUVERGNE SCIENCES

BULLETIN DE L'ADASTA

Novembre 98

N° 43



*La balance
du watt*

*Les cristaux
liquides*

*L'esthétique
des ponts*

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

- Le dossier
de la mécanique
à l'électricité :
la balance du watt .. p. 3
- Le dossier
Les cristaux liquides et
leurs applications ... p. 9
- Activités diverses
La semaine de
la science au collège
Albert Camus..... p. 1
- Le dossier
L'esthétique
des ponts.....p.19

PERMANENCES :

Tous les jours ouvrables
de 9 h 00 à 12 h 00
et le mercredi
de 14 h 00 à 17 h 00

AUVERGNE-SCIENCES

Publication trimestrielle
19, rue de Bien-Assis
63100 CLERMONT-FERRAND
Directeur de la Publication
Suzanne GELY
Rédaction : Jocelyne ALLEE
N° ISSN 1166-5904
Photo de couverture :
Cholestérique
en empreintes digitales
(LASMEA Clermont-Fd)

Dépôt légal Novembre 1998

Imprimeries Centre France - REIX 04 73 60 75 75 - 99857

*Grâce à la compétence
de Pierre LAFAYE
DE MICHEAUX
et Bernard RAGOUT,
l'ADASTA est désormais
sur Internet :
<http://perso.wanadoo.fr>
e-mail adasta@wanadoo.fr*



Il y a un mois déjà qu'élèves et enseignants ont repris le rythme scolaire ; l'ADASTA aussi s'est remise au travail avec courage et enthousiasme pour réussir "la Semaine de la Science".

D'abord nous avons eu la joie de voir notre action reconnue officiellement puisque l'ADASTA a fait partie du "Comité de pilotage" de la Semaine de la Science. Ensuite l'opération "Mesurer la Terre" que nous avons entreprise au Collège Albert Camus les 9-10 Octobre a été un franc succès, grâce surtout au dévouement et aux compétences de notre Vice-Président Paul-Louis HENNEQUIN qui a su intéresser les élèves aux méthodes de triangulation, au principe du GPS et aux calculs de latitude et de longitude du collège Albert Camus.

A l'heure où les plus hautes autorités académiques et ministérielles déplorent le désintérêt des jeunes pour les voies scientifiques, l'ADASTA a montré, en allant au devant des élèves de la banlieue clermontoise qu'elle restait fidèle à sa mission "faire reculer l'ignorance, partager les connaissances, donner le goût des sciences".

Grâce au soutien financier d'EDF, ce nouveau numéro de notre Revue vient vous apporter le témoignage de notre engagement à poursuivre notre mission de développement culturel et scientifique.

Merci à tous ceux qui soutiennent cette action.

S. GELY

Ce numéro a été réalisé grâce à l'aide d'Electricité de France.

Merci à nos sponsors



De la mécanique à l'électricité : la balance du watt

La plupart des physiciens ont aujourd'hui oublié le rôle essentiel joué par J.P. Joule [1] dans l'histoire des mesures électriques. A l'époque, vers 1860-1870, l'Association britannique pour l'avancement des sciences (BAAS) cherchait à établir expérimentalement des mesures électriques pratiques. Les précurseurs comme Gauss, Weber et Kohlrausch avaient imaginé, sur les bases théoriques établies par Cavendish, Coulomb et Ampère, des systèmes d'unités électriques "absolues" fondées sur le centimètre, le gramme et la seconde et sur les effets mécaniques de l'électricité ou du magnétisme, systèmes connus sous le nom de "Systèmes C.G.S.", mais on manquait cruellement d'expériences utilisables pour mesurer avec quelque exactitude les grandeurs essentielles pour la pratique. Par exemple, le développement du télégraphe intercontinental exigeait de prévoir et de savoir mesurer la résistance électrique des câbles sous-marins pour établir le cahier des charges des câblers. Ce sont les expériences de Joule qui, à l'époque, permirent de fixer avec une exactitude de l'ordre du dix-millième la valeur d'étalons représentatifs de l'ohm et du volt.

Nous nous trouvons aujourd'hui dans une situation analogue, toutes proportions gardées : le lien entre les unités mécaniques et les unités électriques est un des points faibles de la mise en pratique de ces dernières.

Pierre Giacomo
Directeur honoraire du BIPM
(Bureau International
des Poids et Mesures)

La définition du volt fait appel à la dissipation de puissance dans un circuit où un courant électrique de 1 ampère dissipe une puissance de 1 watt. Le watt lui-même est défini comme la puissance fournie par une force effectuant un travail de 1 joule en une seconde ou, ce qui revient au même, par une force de 1 newton dont le point d'application se déplace à une vitesse de 1 mètre par seconde dans la direction de la force.

La balance du watt permet de mettre en pratique ces définitions en comparant avec la meilleure exactitude une puissance mécanique et une puissance électrique, sans passer par l'intermédiaire d'une puissance thermique.

LE PRINCIPE

Le principe de la méthode résulte simplement des lois élémentaires de l'électromagnétisme.

Un circuit électrique indéformable est plongé dans le champ d'induction fourni par un aimant. Il est traversé par le flux d'induction φ .

Ce circuit fait l'objet de deux types de mesures.

Dans les mesures du premier type, le circuit est maintenu immobile ; il est parcouru par un courant électrique d'intensité I et l'on mesure la composante verticale F_z de la force à laquelle il est soumis :

$$F_z = I \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (1)$$

Dans le second type de mesures on supprime le courant I , le même circuit est animé d'une vitesse verticale v_z et l'on mesure maintenant la tension électrique U qui apparaît à ses bornes :

$$U = - \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t}$$

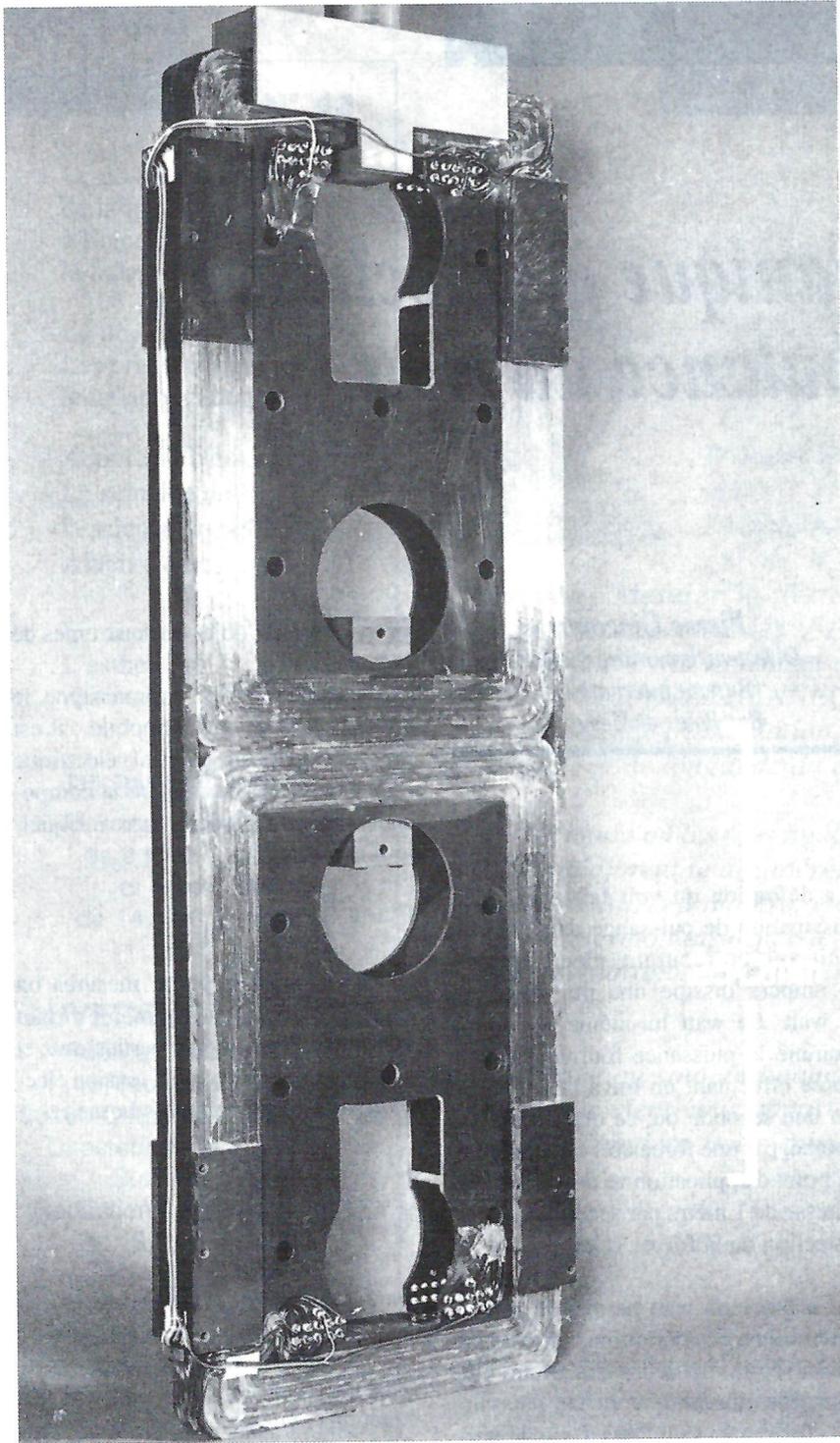
$$\text{donc} \quad - V_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} = U \quad (2)$$

En multipliant membre à membre les équations (1) et (2), le terme $\frac{\partial \varphi}{\partial z}$

s'élimine et on obtient une relation entre une puissance électrique et une puissance mécanique.

$$UI = - F_z V_z \quad (3)$$

La géométrie du champ comme celle du circuit disparaissent, à condition, bien entendu, que les deux parties de l'expérience soient faites pour une même position du même circuit, avec une même distribution du champ d'induction, et que la vitesse V_z et la force F_z soient bien colinéaires.



▲ Figure 1a - La double bobine mobile comprend 1681 tours de fil de cuivre verni de 1 mm de diamètre, chaque tour formant un huit. L'ensemble est noyé dans une résine epoxy assurant à la fois la rigidité et l'isolement. Sa masse est voisine de 30 kg. La résistance électrique est de 100 Ω lorsque toutes les spires sont mises en série. Lorsque le courant dans la bobine passe de + 0,01 A à - 0,01 A, la force exercée par le champ d'induction de 0,7 T sur la branche centrale varie à peu près de 10 N, en passant de + 5 N à - 5 N ; l'équilibre de la balance est rétabli en

ajoutant une surcharge de masse voisine de 1 kg. Photographie extraite de [2] avec l'aimable autorisation des auteurs.

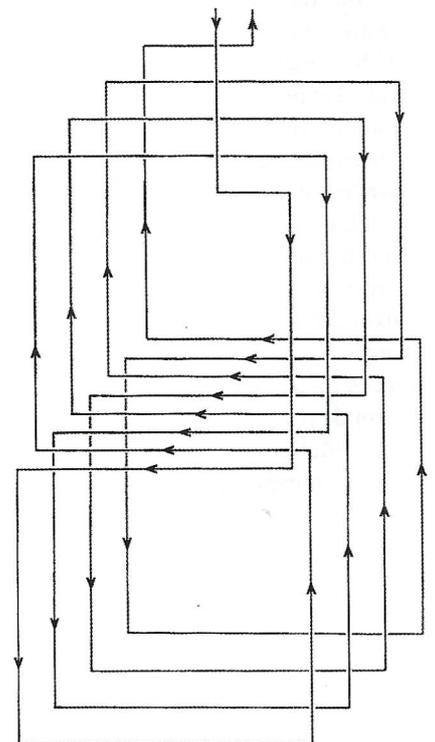
▲ Figure 1b - Principe du bobinage en "huit" de la double bobine. Les 1681 spires passent donc en tout 3362 fois dans la branche centrale.

LA REALISATION

Pour réaliser ces conditions et obtenir des valeurs mesurables avec exactitude, on est conduit à utiliser le dispositif suivant [2].

Le circuit est constitué principalement d'une bobine double, en forme de "huit", enroulée sur un support très rigide, dont le bras central est rectiligne et horizontal (fig. 1). Ce bras central est placé au centre de l'entrefer d'un puissant aimant permanent. La disposition en huit assure que les branches verticales du huit sont soumises à des forces dont la résultante et le moment résultant s'annulent deux à deux, par symétrie, pourvu que le champ périphérique soit lui-même distribué de façon symétrique ; elle permet en outre d'éloigner les branches extrêmes, horizontales, dans une région du champ où elles sont soumises à des forces dont la résultante est faible et dont le moment résultant s'annule.

Afin de mesurer la composante verticale F_z de la force à laquelle est soumise la bobine, celle-ci est suspendue à l'une des extrémités du fléau d'une



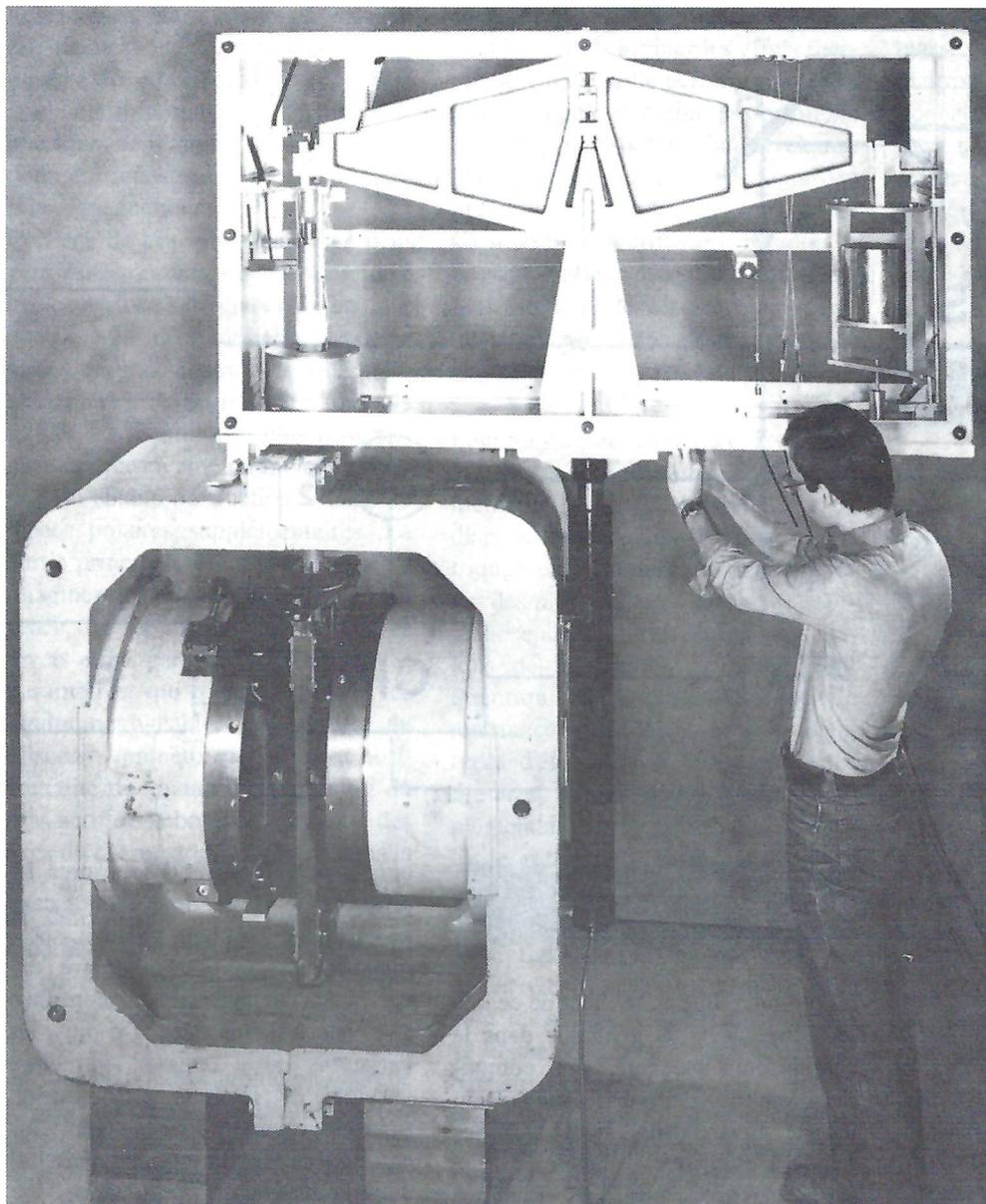


Figure 2 - Vue d'ensemble. La bobine est placée à gauche dans l'entrefer de l'aimant permanent (6 000 kg) où règne un champ d'induction de 0,7 T. Elle est suspendue à l'extrémité gauche du fléau de la balance, elle-même supportée par un cric hydraulique qui permet d'ajuster la position de la bobine dans l'entrefer. Le fléau, de 1,2 m de longueur, est en alliage d'aluminium fondu, et pèse 44 kg. Au-dessus de la bobine on distingue les éléments qui permettent le réglage de verticalité de la bobine et l'asservissement de sa vitesse de déplacement ainsi que le maniement de la surcharge de 1 kg. A l'autre extrémité du fléau, la tare comprend une masse creuse dont le volume sert à équilibrer l'effet de la poussée de l'air sur la bobine. On doit cependant tenir compte de la poussée de l'air dans le calcul de la force exercée par la surcharge de 1 kg pour équilibrer l'effet du courant électrique passant dans la bobine. Photographie extraite de [2] avec l'aimable autorisation des auteurs.

balance (fig. 2). Les surcharges que l'on doit ajouter (ou retrancher) pour équilibrer la balance lorsque le courant circule dans la bobine permet de mesurer la force $\pm F_z = \pm mg$.

Le fléau de la balance permet aussi d'effectuer le second type de mesure. En l'absence de courant I, si l'on fait osciller lentement le fléau, la bobine est entraînée dans un mouvement de translation circulaire avec une vitesse qui devient verticale lorsque le fléau passe en position horizontale. Afin de mesurer et même d'asservir la vitesse V_z , la bobine est équipée d'un rétro-réflécteur (miroir trièdre trirectangle appelé aussi quelquefois "coin de cube") qui termine le bras vertical d'un interféromètre de Michelson.

Cet interféromètre (fig. 3) est constitué d'une lame séparatrice semi-réfléchissante inclinée à 45°, située en-dessous du premier rétro-réflécteur, et d'un second rétro-réflécteur, fixe, situé à l'extrémité du second bras, horizontal, de l'interféromètre. Il est éclairé à l'aide du rayonnement fourni par un laser, rayonnement dont la longueur d'onde, $\lambda \approx 0,633 \mu\text{m}$, sert d'étalon de longueur. Un photorécepteur placé sur le faisceau de sortie de l'interféromètre voit défiler des "franges" d'interférence lorsque le premier rétro-réflécteur s'éloigne ou se rapproche, à raison d'une frange pour un déplacement de $(\lambda / 2) \approx 0,316 \mu\text{m}$. Il suffit de mesurer à quelle fréquence ces franges défilent devant le photorécepteur pour mesurer la vitesse de trans-

lation V_z . Mieux encore, en comparant cette fréquence à une fréquence de référence, on sait asservir le mouvement du fléau à communiquer à la bobine une vitesse v_z de valeur exactement connue. Une fréquence de l'ordre de 6 kHz correspond à peu près à une vitesse de 2 mm/s que l'on peut sans risque imposer à l'extrémité du fléau d'une balance et pour laquelle U est ici voisin de 1 volt.

Dans une version récente de ces mêmes expériences [3] le dispositif utilisé est très semblable à celui d'un haut-parleur électromagnétique : la bobine est cylindrique, à base circulaire, d'axe vertical ; elle est plongée dans un champ d'induction radial, puissant, de révolution, d'axe vertical, fourni par un aimant permanent dont

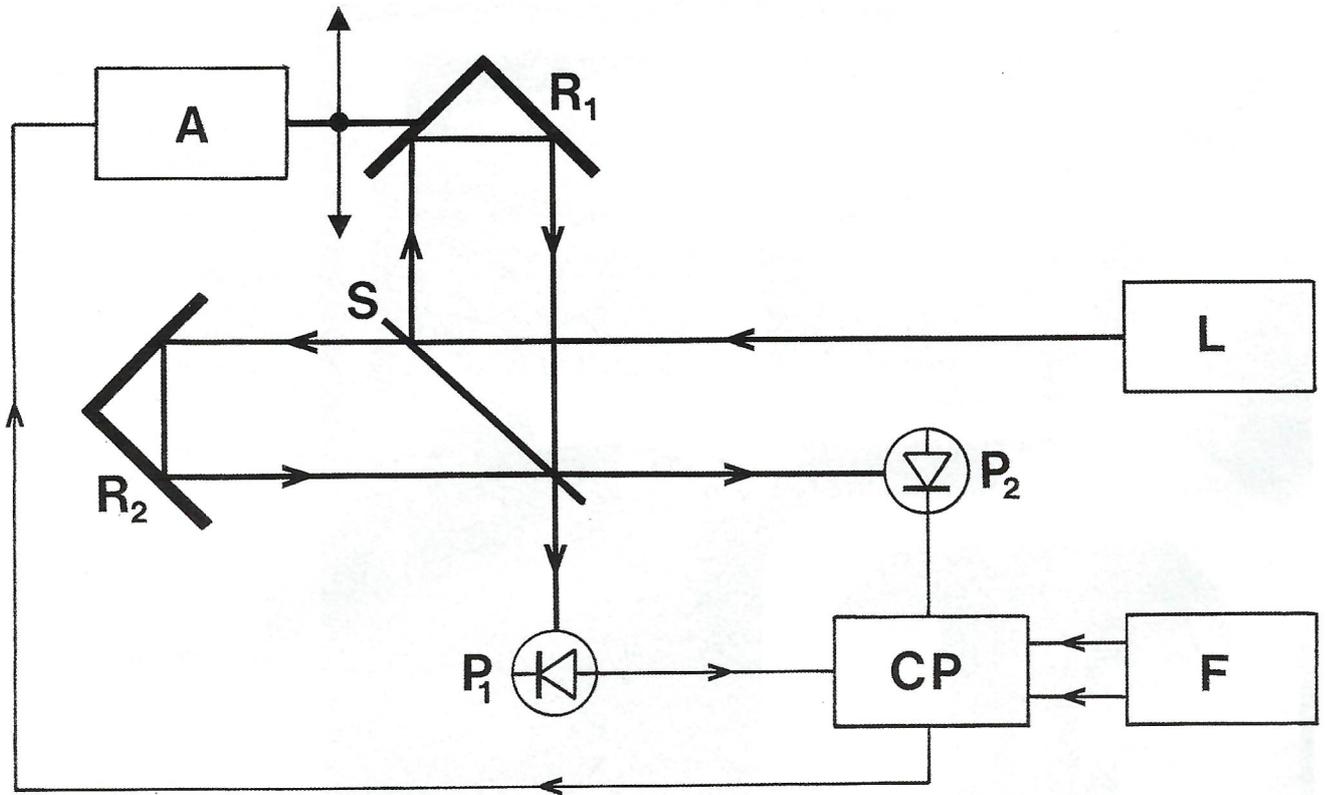


Figure 3 - L'interféromètre de Michelson associé à la balance du watt. Le rayonnement émis par le laser L est partiellement réfléchi et partiellement transmis par la lame séparatrice S, pour se réfléchir sur les deux rétro réflecteurs, l'un mobile R1, fixé à la bobine, l'autre fixe R2. Les photorécepteurs P1 et P2 voient défiler les états d'interférence des deux faisceaux recombinaés par S. Ils délivrent chacun un signal électrique qui est fonction sinusoidale du déplacement de R1. On s'arrange pour que les signaux délivrés par P1 et P2 soient décalés en quadrature de phase, ce qui permet de les comparer efficacement, à l'aide du comparateur de phase CP, au signal délivré par le générateur de référence F. La différence de phase alimente la servocommande A qui asservit la vitesse de déplacement de la bobine et de R1.

l'une des pièces polaires est un cylindre plein à base circulaire pénétrant dans l'axe de la bobine et l'autre est un cylindre creux à base circulaire entourant celle-ci. C'est un moyen efficace d'assurer la symétrie et de réduire les composantes parasites des forces électromagnétiques susceptibles de perturber les mesures. En outre, il est plus facile de réaliser le bobinage et de disposer le rétro réflecteur au voisinage du centre de symétrie de la bobine.

LES DIFFICULTES

La première difficulté vient de ce que le mouvement de la bobine dans le champ peut présenter des composantes de translation parasites suivant les axes horizontaux Ox et Oy et des rotations parasites d'angles α , β , γ autour des trois axes. Les équations (1) et (2) doivent alors comprendre des composantes de la force et de la tension dues à des termes en $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ et $\frac{\partial \varphi}{\partial y}$

de plus, un système d'équations analogues doit exprimer le moment résultant avec des termes en

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}, \frac{\partial \varphi}{\partial \gamma}$$

et les tensions induites liées à ces différents termes.

Il faut donc prendre toutes les précautions possibles pour annuler ces termes parasites. L'une des conditions qui s'imposent indirectement est que la force Fz soit bien verticale puisqu'on veut la comparer à une force de pesanteur mg. On doit aussi mesurer avec toute l'exactitude désirée l'accélération g due à la pesanteur à l'emplacement où se trouve la masse mar-

quée m et au moment des mesures. La présence de masses importantes dans le voisinage : aimant, balance, socle massif nécessaire pour soustraire l'expérience à l'agitation du sol, contribue à la valeur locale de g. De plus, les variations de g dues à l'attraction variable de la lune et du soleil (marées gravimétriques) ne sont plus négligeables si l'on vise une incertitude inférieure au dix-millionième.

Les variations relatives à l'air ambiant ont un double effet perturbateur : l'indice de réfraction de l'air modifie la longueur d'onde λ et la poussée d'Archimède due à l'air agit sur la totalité de l'équipage mobile, en même temps que sur le poids de la masse marquée m. Comme il est difficile de maîtriser la température, la pression, l'humidité et la teneur en CO₂ de l'atmosphère ambiante, il est plus efficace de maintenir la totalité de l'expérience sous vide. C'est ce qui a été fait dans la version la plus récente [3]. Mais il faut alors disposer de masses marquées étalonnées et conservées en permanence sous vide. Cela ne dispense pas de réguler la température, car le flux φ en dépend à raison de $2 \cdot 10^{-4}$ par °C en valeur relative.

Les masses marquées et la balance elle-même sont inévitablement soumises à des forces parasites dues aux gradients importants du champ périphérique de l'aimant. Elles doivent donc être construites avec des matériaux amagnétiques.

Certains de ces effets parasites peuvent être mesurés ou calculés avec une exactitude suffisante pour en tenir compte par des corrections appropriées ou pour estimer les tolérances que l'on peut admettre. On a toujours intérêt à les réduire le plus possible, par exemple en améliorant la distribution du champ d'induction à l'aide de pièces polaires supplémentaires. La partie principale du travail consiste à imaginer des moyens de vérifier l'absence, ou au moins l'innocuité, des divers effets parasites, et d'ajuster les paramètres qui permettent de les rendre négligeables : verticalité du faisceau lumineux de mesure, horizontalité du champ d'induction et du bras actif de la bobine, verticalité des axes du champ et de la bobine dans la version cylindrique récente, absence de déformation de la bobine et de modification du flux φ sous l'influence du courant I , localisation de la bobine dans une région où $\frac{\partial \varphi}{\partial z}$ est stationnaire

en fonction de z . Comme on cherche à avoir la meilleure exactitude des pesées, on doit utiliser des surcharges m voisines de 1 kg, donc des forces de l'ordre de 10 newtons. L'équipage mobile doit donc être très massif pour rester indéformable. Cela conduit à une masse "morte" de l'ordre de 10 à 30 kg. Le fléau de la balance doit en outre être assez long pour que le mouvement de la bobine soit à peu près rectiligne sur une longueur de trajet appréciable. Cela conduit à une longueur de fléau de l'ordre du mètre, donc à une balance elle-même très lourde avec laquelle il est difficile d'atteindre une incertitude des pesées largement inférieure à 100 microgrammes sur 1 kg, soit une incertitude relative largement inférieure à 10^{-7} .

LES MESURES ELECTRIQUES

L'expérience permet facilement d'inverser le sens du courant I ou le signe

de la vitesse v_z , donc aussi de la tension U , afin d'éliminer les effets thermoélectriques. Elle permet aussi d'explorer un petit domaine des positions possibles de la bobine dans le champ d'induction, aussi bien au cours des mesures de F_z que des mesures de U . C'est un moyen efficace d'encadrer le passage du fléau autour de sa position horizontale et de vérifier si les résultats sont bien stationnaires autour de cette position.

Pour mesurer le courant I et la tension U , il y a intérêt à se référer aux meilleurs étalons disponibles. Or on dispose aujourd'hui d'étalons électriques extrêmement stables, fondés sur des phénomènes quantiques : l'effet Josephson fournit d'excellents étalons de tension [4] et l'effet Hall quantique d'excellents étalons de résistance [5]. C'est donc à ces deux types d'étalons que l'on rapporte les mesures, en utilisant la relation supplémentaire pour fournir une intensité de référence. Notons au passage que les valeurs de ces deux types d'étalons quantiques doivent être elles aussi rattachées à la définition des unités électriques. Il se trouve que, dans le cas de la résistance, on dispose d'une réalisation théoriquement parfaite de l'ohm, en passant par l'impédance, à une fréquence connue, d'un condensateur calculable de Lampard et Thompson [6].

Avec $I = \frac{U}{R}$, l'équation (3) devient

$$mgV_z = \frac{U^2}{R}$$

elle permet donc de déduire la valeur de U des valeurs connues de R , m , g et V_z .

Ces mesures ont joué et joueront encore à l'avenir un rôle essentiel dans la détermination de la valeur de la constante K_J qui relie la tension électrique à une fréquence dans les étalons à effet Josephson, avec une incertitude qui est actuellement estimée à quelques dix-millionièmes.

En raison de la grande stabilité des étalons électriques quantiques, on envisage même d'utiliser des expériences de ce type pour vérifier la sta-

bilité à long terme des étalons de masse. L'objectif est dans ce cas de maîtriser toutes les difficultés mentionnées en réduisant les incertitudes pour ne pas excéder une incertitude relative résultante de quelques cent-millionièmes. C'est encore un rêve, mais les métrologues sont coutumiers de ce genre de rêve.

BIBLIOGRAPHIE ET NOTES

[1] James Prescott Joule (1818 - 1889), physicien anglais, établit en 1842 les "lois de Joule" reliant le dégagement de chaleur au passage du courant électrique dans une résistance. A la même époque, il démontra et mesura de façon précise l'équivalence de l'énergie électrique et de l'énergie thermique à l'énergie mécanique en déterminant l'équivalent mécanique de la calorie, $J = 4,18$ joule/calorie.

[2] B.P. Kibble, I.A. Robinson, J.H. Belliss ; A realization of the SI watt by the NPL moving-coil balance, *Metrologia*, 1990, 27, 173-192.

[3] I.A. Robinson, B.P. Kibble ; The NPL moving-coil apparatus for measuring Planck's constant and monitoring the kilogram, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, 46, 596-600.

[4] Pour réaliser un étalon de tension électrique à l'aide de l'effet Josephson on utilise une jonction, dite de Josephson, c'est-à-dire un mauvais contact de très petite surface entre deux électrodes de métaux appropriés, plomb ou étain par exemple, rendues supraconductrices par refroidissement à la température de l'hélium liquide et séparées par une couche très mince d'oxyde. Lorsqu'on irradie une telle jonction avec un rayonnement électromagnétique hyperfréquence de fréquence f , il apparaît aux bornes de la jonction, convenablement polarisée, des marches de potentiel U_n correspondant à $2eU_n = nhf$, où n est un nombre entier qui peut être de l'ordre de plusieurs centaines, e la charge électrique élémentaire et h la constante de Planck. On est arrivé à mettre en série plusieurs milliers de telles jonctions afin d'obtenir des tensions de l'ordre

du volt et même de 10 V. On appelle constante de Josephson la constante $K_j = \frac{U_n}{nf}$ qui doit être égale à $\frac{h}{2e}$.

[5] L'effet Hall quantique apparaît dans un échantillon semiconducteur de très faible épaisseur, refroidi à très basse température, inférieure à 1 K, et soumis à un champ d'induction magnétique intense, de l'ordre de 10 T, perpendiculaire à sa surface. Lorsque l'échantillon, rectangulaire, est soumis à un courant longitudinal d'intensité I , il apparaît une tension de Hall transversale U_j et la résistance de

Hall $\frac{U_j}{I}$ est quantifiée avec $\frac{U_j}{I} = i \frac{h}{e^2}$,

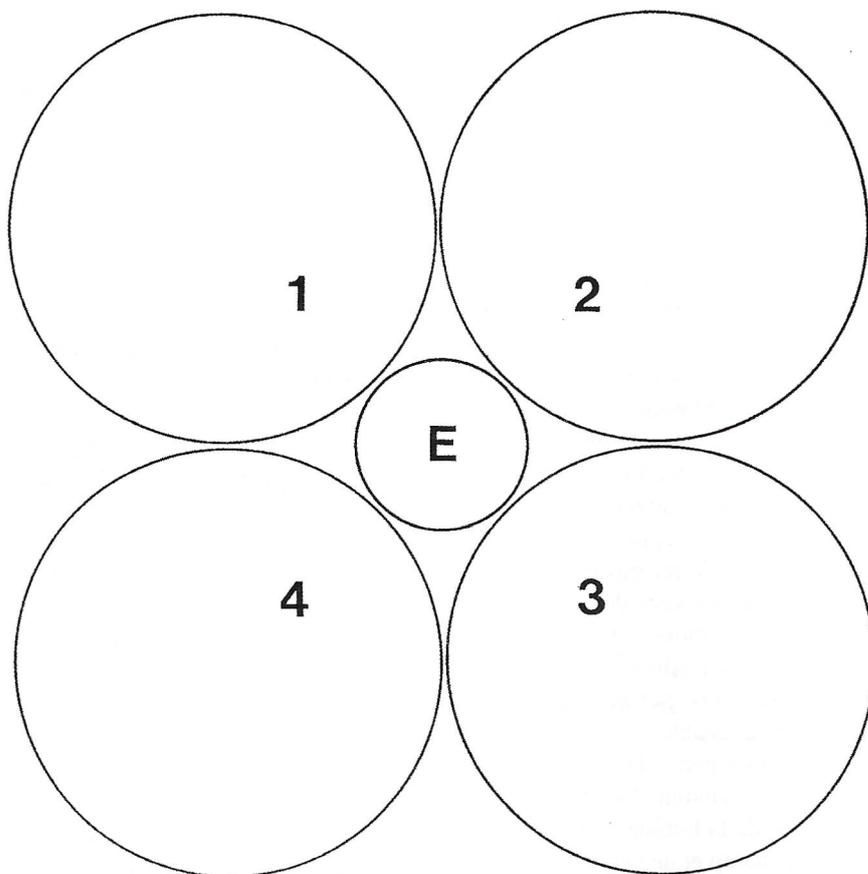
où i est un entier (limité à 2 ou 4) avec les mêmes e et h qu'en [4]. En même temps la résistance longitudinale s'annule, ce qui constitue un test de la quantification. On appelle constante de Von Klitzing la constante $R_k = i \frac{U_j}{I}$

qui doit être égale à $\frac{h}{e^2}$.

Notons qu'ici comme pour l'effet Josephson il est difficile d'être sûr que l'on a éliminé tous les termes parasites qui peuvent, dans la mise en pratique, altérer la relation entre K_j ou R_k et les constantes fondamentales e et h . C'est la raison pour laquelle les métrologues préfèrent parler des constantes K_j et R_k plutôt que de $\frac{h}{2e}$ et $\frac{h}{e^2}$.

La détermination des valeurs de ces constantes est cependant considérée comme faisant partie des meilleures voies pour accéder aux valeurs des constantes fondamentales e et h .

[6] Ce condensateur calculable résulte d'une propriété découverte en 1956 par D. G. Lampard et A.M. Thompson, physiciens australiens. Dans un ensemble cylindrique formé de quatre électrodes métalliques contiguës, formant donc un tube fermé, de section droite quelconque mais présentant une symétrie électrique, c'est-à-dire telles que les coefficients d'influence soient égaux suivant les deux diagonales, $C_{13} = C_{24}$, ces coefficients d'influence sont uniquement proportionnels à la longueur, avec un coefficient de proportionnalité indépendant de la forme de la section droite et calculable théorique-



ment. La détermination de la valeur d'une "capacité" de ce type se réduit donc à la détermination de sa longueur. En pratique, pour éliminer les effets d'extrémités, on détermine la variation de capacité correspondant à une variation de longueur, mesurable avec exactitude, en déplaçant longitudinalement un écran que l'on insère entre les électrodes. Comme les quatre électrodes ne peuvent pas être strictement contiguës, on se limite à des électrodes presque tangentes, ce qui introduit un petit terme correctif du second ordre en fonction du rapport entre l'interstice laissé entre elles et les autres dimensions (fig. 4).

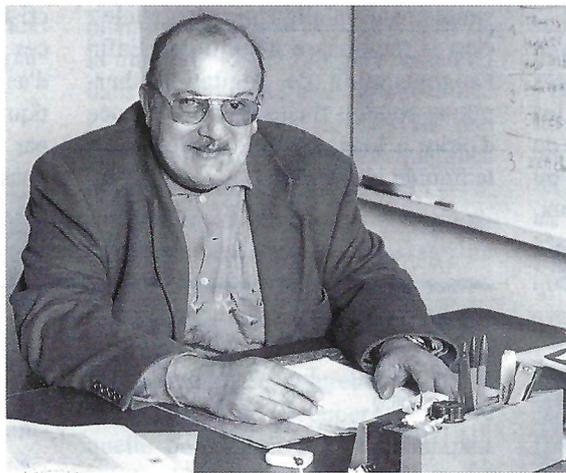
Figure 4 - Section droite d'un condensateur calculable. Les électrodes 1, 2, 3, 4 sont des cylindres à base circulaire de même diamètre, ce qui assure simplement la symétrie électrique $C_{12} = C_{34}$. Un écran fixe et un écran mobile, qui se font face en E, permettent de limiter la longueur utile et de la faire varier en mesurant le déplacement de l'écran mobile, perpendiculairement au plan de la figure.

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel	150 F
Adhésions à titre collectif	500 F
Membre bienfaiteur	1000 F

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, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand**
Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04

Les cristaux liquides et leurs applications



I - L'HISTORIQUE

Traditionnellement, on nous enseigne que la matière existe sous trois états : solide, liquide ou gazeux. En fait cette classification est exagérément simplificatrice. On le sait depuis 1888, année où REINITZER observe le curieux comportement du nonanoate de cholestéryle. Ce produit semble fondre deux fois, la première pour se transformer de solide en un liquide visqueux et trouble, la seconde pour se clarifier et donner un liquide paraissant tout-à-fait normal. Ces deux phénomènes interviennent à des points fixes de température. L'année suivante, LEHMANN effectue les mêmes observations avec d'autres composés organiques. Il remarque que la phase trouble présente à la fois la fluidité d'un liquide et la biréfringence d'un solide cristallin. Il invente alors pour la désigner le terme

Michel DUGAY

Maître de Conférences à l'Université Blaise Pascal, chercheur au LASMEA (Laboratoire des Sciences des Matériaux pour l'Electronique et l'Automatique) Clermont-Ferrand.

de cristal liquide (flüssiger Kristall). Il faut attendre 1922 et la publication des remarquables travaux de Georges FRIEDEL pour avoir la preuve que ces cristaux liquides correspondent à une organisation de la matière intermédiaire entre l'état solide et l'état liquide.

L'un des grands mérites de FRIEDEL est aussi de montrer la relative insuffisance de pertinence de l'appellation "cristal liquide". En effet, il peut exister quantité d'organisations différentes entre le véritable solide et le véritable liquide. FRIEDEL va les recenser, les caractériser et proposer une nomenclature basée sur des racines grecques. En systématisant celle-ci, il attribue aux cristaux

liquides le nom scientifique de corps mésomorphes (grec : de forme intermédiaire) et nomme leurs états possibles mésophases.

II - GENERALITES SUR LES MESOMORPHES

Le trait essentiel qui distingue les solides cristallins et les liquides classiques est la présence ou l'absence d'un ordre à longue portée. Les cristaux liquides de LEHMANN correspondent à des états de la matière organisés avec un ordre partiel. Fort de cette constatation, FRIEDEL généralise le raisonnement et étend son domaine de validité. Il ne se réfère plus à l'aspect ou à des propriétés physiques plus ou moins caractéristiques mais au degré d'ordre du système.

Ceci le conduit à classer les mésomorphes en deux très grandes familles :

- **Les thermotropes** qui évoluent par variation de leur température
- **Les lyotropes** qui, à la manière des savons, forment des solutions capables de s'organiser en micelles. Chez ces composés, la naissance de mésophases résulte d'une variation de concentration.

Nous nous intéresserons seulement aux cristaux liquides thermotropes. On peut encore les classer en plusieurs catégories selon la géométrie de leur molécule. Les plus nombreux et historiquement les premiers découverts sont les **calamitiques**.

Etymologiquement ce mot signifie en forme de roseau. Les autres espèces sont les **disquatiques** ou les **boliques**, molécules en forme de cylindres plats ou de bols plus ou moins creux munis de bras latéraux. Cet exposé se limitera aux composés calamitiques et à leurs applications.

III - LES MESOPHASES DES CALAMITQUES

Même si l'image paraît simple et fruste, le fait d'assimiler les roseaux à de simples bâtons suffit largement, au plan qualitatif, à comprendre les arrangements moléculaires de tels matériaux. Soit donc un cristal dont les éléments constitutifs sont des bâtonnets ; élevons sa température pour assister à la désagrégation de l'ordre.

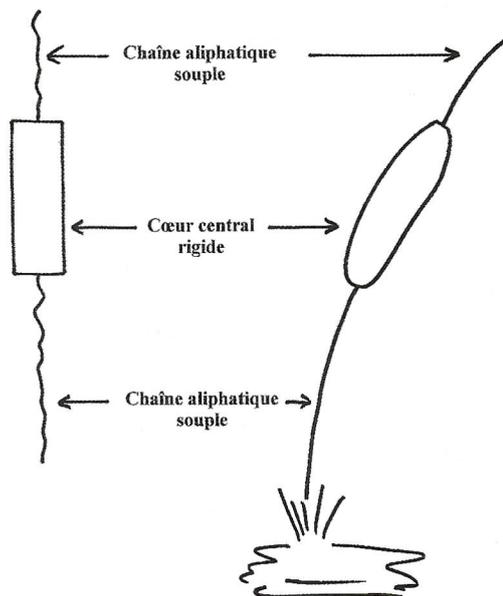


figure 1 : cristaux calamitiques

Si les forces de cohésion entre bâtonnets voisins latéraux sont plus grandes qu'entre bâtonnets voisins par les bouts, nous allons arriver à une situation où les bâtonnets forment des couches glissant les unes sur les autres. Le matériau possède donc une certaine fluidité tout en conservant un certain ordre (celui d'une organisation lamellaire). Il est donc devenu cristal liquide ! En nomenclature de FRIEDEL, il s'agit d'une mésophase **smectique**. En élevant encore plus la température, on désagrège à son tour l'organisation lamellaire. Ses couches s'interpénètrent au point de former simplement un alignement parallèle : c'est la mésophase **nématique**. Enfin l'augmentation de l'agitation thermique conduit finalement à l'absence d'ordre à longue portée caractérisant le liquide isotrope.

Nous venons ainsi de découvrir l'existence de deux mésophases. Tout d'abord la phase nématique, simplement caractérisée par l'alignement des molécules sur une direction commune dite **directeur de la mésophase**. Ensuite la phase smectique caractérisée par une organisation lamellaire. A la réflexion, il doit exister bien des façons différentes de concevoir ce type d'ordre. Les bâtonnets sont-ils orthogonaux aux plans des couches ou inclinés ? Dans une couche les centres de gravité sont-ils disposés au hasard ou obéissent-ils à des règles ? Si oui, lesquelles ? Pour les spécialistes des cristaux liquides, les réponses à toutes ces questions conduisent à distinguer d'assez nombreuses phases smectiques. Elles sont simplement repérées par une lettre et notées phase SA, phase SB, SC... On arrive à la lettre I.

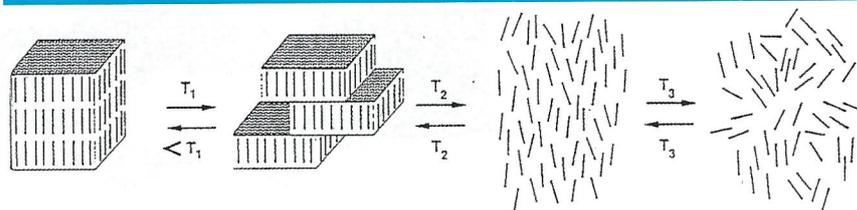


figure 2 : de l'ordre au désordre

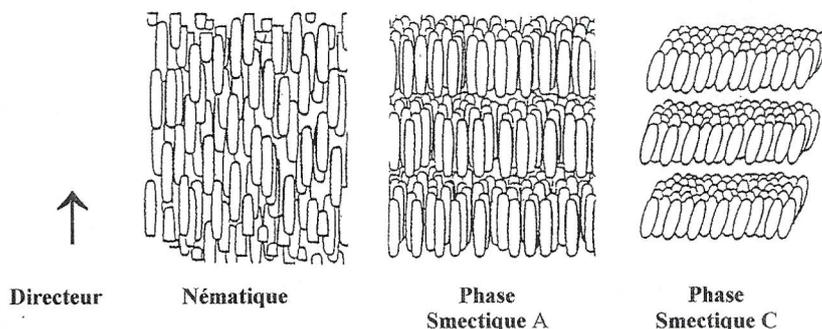


figure 3 : nématiques et smectiques

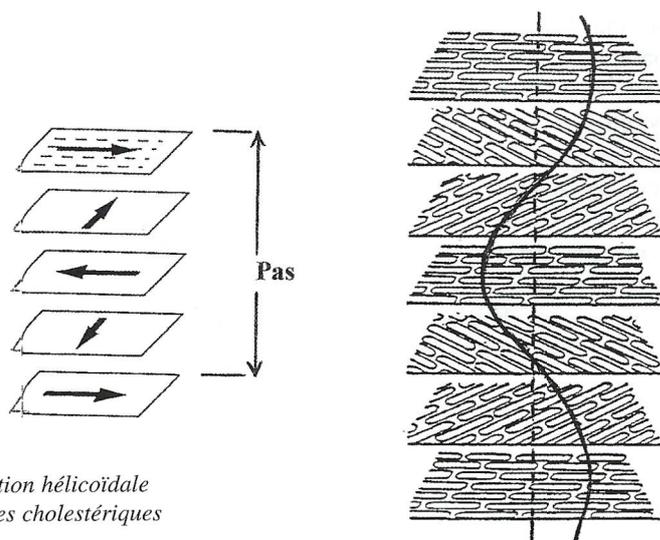


figure 4 : organisation hélicoïdale des cristaux liquides cholestériques

Les molécules mésomorphes avec carbone(s) asymétrique(s) donnent une phase nématique spéciale, présentant la particularité d'avoir une organisation hélicoïdale. On peut la décomposer en une infinité de couches parallèles, chacune possédant son directeur propre tangent localement à l'hélice. Tous les esters du cholestérol formant des cristaux liquides entrent dans cette catégorie. Ils ont laissé leur nom comme nom générique de toute la famille : ce sont des cristaux liquides cholestériques. Quant à la mésophase elle-même, on la désigne aussi sous le nom de phase cholestérique. Retenons que, fondamentalement, elle n'est qu'un cas particulier de nématique.

IV - DE L'ALIGNEMENT DES CRISTAUX LIQUIDES

Possédant une fluidité de liquide, les cristaux liquides ont besoin d'un récipient pour les contenir ou, au minimum, d'un support sur lequel s'étaler. L'orientation que prennent leurs molécules par rapport aux parois est régie par des phénomènes complexes déterminant ce que l'on appelle l'alignement du cristal liquide.

Parmi les techniques d'alignement des cristaux liquides, certaines conduisent les molécules à se disposer avec leur grand axe parallèle au support. D'autres au contraire aboutissent à les amener à se mettre orthogonaux aux supports. On sait faire des dispositions plus ou moins obliques mais les deux situations extrêmes, parallèle ou perpendiculaire, correspondent aux cas très majoritairement rencontrés. Leur importance justifie l'introduction de deux éléments de vocabulaire qu'il faut connaître : **alignement homogène** pour le cas **parallèle** et **alignement homéotrope** pour le cas **perpendiculaire**.

Il faut également savoir que l'application d'un champ électrique assez intense provoque l'alignement des nématiques avec directeur en tout point normal au champ. Cet effet aboutit en particulier au déroulement des hélices cholestériques (soumis à

un champ, un cholestérique devient un nématique tout-à-fait ordinaire).

V - LES TEXTURES DES CRISTAUX LIQUIDES

1) Les défauts des cristaux liquides

Les cristaux liquides présentent de nombreux défauts dans leur organisation. Ceux-ci s'observent parfaitement avec un microscope travaillant en lumière polarisée. Le microscope polarisant est typiquement l'outil d'étude des cristaux liquides et les phénomènes liés à la polarisation de la lumière jouent un rôle essentiel dans beaucoup de leurs applications. C'est pourquoi je vais ouvrir une parenthèse pour rappeler quelques notions fondamentales.

La lumière est une onde électromagnétique créant sur son passage un champ électrique et un champ magnétique orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation. Dans la lumière naturelle le champ électrique peut occuper n'importe quelle orientation dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. En lumière polarisée des règles fixent sa position.

Certains dispositifs éclairés en lumière naturelle ont la propriété de transmettre de la lumière polarisée rectilignement, c'est-à-dire avec champ électrique fixé sur une direction déterminée. Ce sont des **polariseurs**. Un polariseur recevant de la lumière déjà polarisée porte en général le nom **d'analyseur**. Si sa direction de polarisation est parallèle à celle du vecteur champ électrique incident il transmet intégralement. Si elle lui est perpendiculaire, il provoque l'extinction totale. On dit alors que polariseur et analyseur sont **croisés**.

Interposons maintenant entre polariseur et analyseur croisés un matériau **anisotrope**.

- D'abord une lame de ruban adhésif. La direction de traction a des propriétés particulières. Rien ne se passe si on la met parallèle ou perpendiculaire au plan de transmission de l'analyseur, mais si on l'oriente de façon quelconque il y a retour de la lumière avec coloration.

- Ensuite une lame cristalline. Il n'y a qu'à admirer !

L'explication du phénomène réside dans une propriété optique des corps anisotropes, la biréfringence. Quand ils reçoivent une vibration lumineuse,

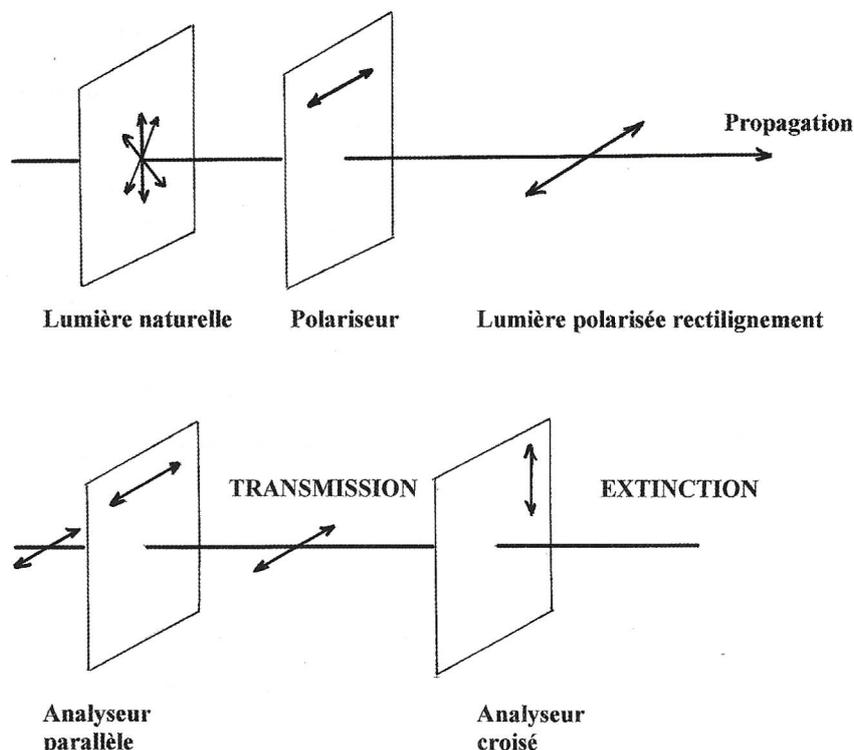


figure 5 : polarisation de la lumière

ils en transmettent deux, avec des indices de réfraction différents. Les colorations observées en lumière polarisée sont la conséquence d'interférences entre ces deux ondes. En général, la biréfringence est complexe à analyser. Toutefois pour les cristaux liquides le problème se simplifie un peu : leur comportement est entièrement déterminé par la connaissance de deux indices de réfraction, un mesuré parallèlement à une direction privilégiée dite **axe optique** et un transverse par rapport à cet axe.

L'axe optique des calamitiques coïncide avec la direction des grands axes moléculaires. Leurs défauts d'orientation sont des régions de l'espace où la direction de cet axe se modifie très rapidement. Au microscope polarisant, ces changements brusques s'observent parfaitement et donnent des figures souvent caractéristiques de la nature de la mésophase étudiée. On leur donne le nom de **texture** des mésomorphes.

2) Les textures des nématiques

Chez les nématiques on détecte dans les plages observées la présence de fils, c'est à dire des lignes noires sans forme géométrique définie. Un examen plus attentif montre qu'en fait ces fils peuvent être de plusieurs sortes. Certains sont effectivement de simples lignes noires mais d'autres paraissent gainés, soit d'une enveloppe de pénombre, soit d'une enveloppe brillante. Assez souvent on rencontre des fils exactement perpendiculaires à la préparation. Ils sont donc vus par le bout, comme des points noirs. FRIEDEL les appelle des noyaux.

Lorsqu'ils sont nombreux, les **noyaux** apparaissent reliés par des plages noires. Si on fait tourner l'analyseur, on entraîne ces plages dans la rotation alors que les noyaux restent fixes. Il s'agit alors de la texture à **extinction roulante**.

Les fils sont des axes d'enroulement de la structure nématique, autrement dit des frontières à la traversée desquelles l'orientation du directeur change brusquement. Vous voyez ici quelques-unes des dispositions usuellement observées. L'axe optique reste toujours tangent à l'un des traits des dessins.

3) Les textures des smectiques

a) Les coniques focales

Georges FRIEDEL a remarqué que, dans les préparations de smectiques A, les fils ont toujours une géométrie rigoureusement définie. Ce sont des coniques associées par paires, une ellipse et une hyperbole.

Elles sont en **position focale** ce qui signifie qu'elles appartiennent à deux plans orthogonaux et que les foyers de l'une sont les sommets de l'autre.

L'aspect d'un tel groupe dépend énormément de son orientation dans la structure observée.

Si, à partir des points où s'arrête l'arc d'hyperbole, on trace les tangentes à l'ellipse, on obtient deux cônes limitant ce que l'on appelle un **domaine focal**. Celui-ci est une zone de changement d'orientation de l'axe optique. Ce dernier est porté, en tout point du domaine, par la tangente commune aux deux coniques issue de ce point.

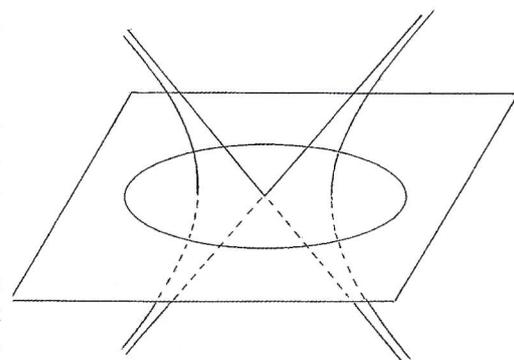


figure 7 : ellipse et hyperbole homofocales

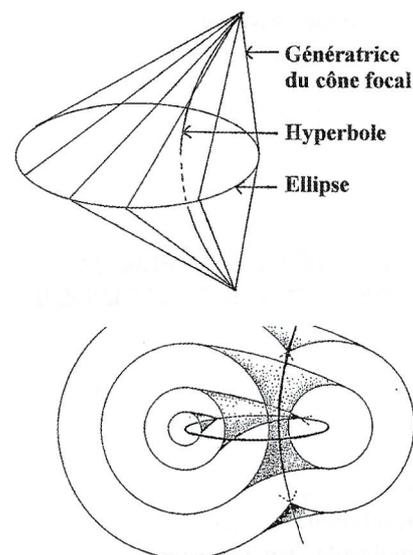


figure 8 : domaine focal et cyclides de Dupin

La géométrie des coniques nous enseigne que toute droite tangente à deux coniques focales est orthogonale, en chacun de ses points, à des surfaces parallèles, les "cyclides de Dupin". C'est à partir de ce résultat, et uniquement à partir de ce résultat, que FRIEDEL postule l'existence chez les smectiques d'une organisation lamellaire. Les coniques focales sont dues à des changements d'orientation des couches et les raccords entre plans d'orientations différentes se font suivant des cyclides de Dupin. La démarche d'interprétation de FRIEDEL est absolument remarquable et les rayons X ne sont venus en confirmer l'exactitude que postérieurement.

b) D'autres textures

D'autres textures sont observables chez les smectiques. La texture en

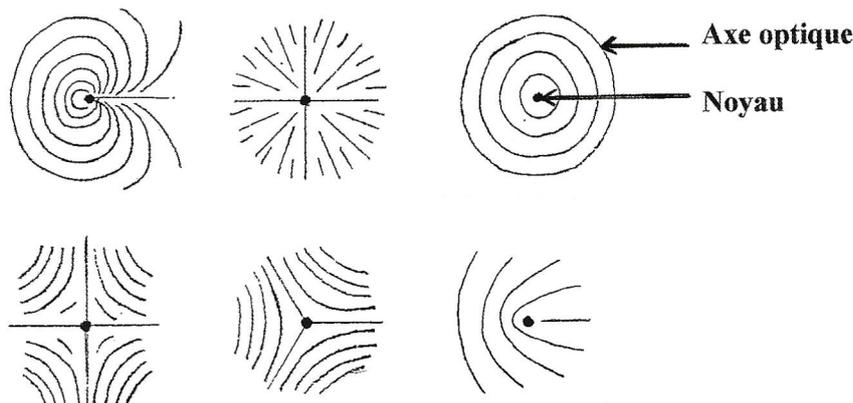
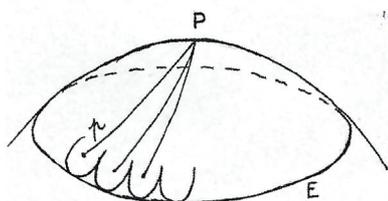


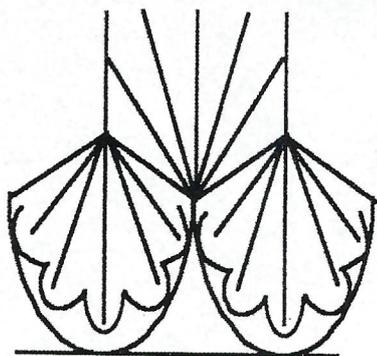
figure 6 : exemples de modes d'enroulement de la structure nématique

éventail est l'une des plus caractéristiques. Voici comment elle se forme. Une ellipse E de grande taille se trouve plaquée sur la surface non parfaitement plane mais légèrement convexe d'un corps smectique. Son hyperbole conjuguée rencontre cette surface presque normalement au point P. Tangentiellement à E, se disposent des ellipses plus petites et plus excentriques dont on ne voit qu'une moitié. Leur ensemble forme une sorte de **feston** régulier. Les hyperboles conjuguées de ces petites ellipses sont des arcs tels que pP, convergeant vers le même point P.

Chaque petite ellipse est à son tour le support d'un feston d'ellipses encore plus petites et plus excentriques, avec leur réseau d'hyperboles convergeant cette fois en p. L'imbrication peut se poursuivre et aller très loin. Elle donne finalement une ornementation en éventails. Pour des phases smectiques ordonnées telles que SE cette ornementation se complique par la superposition d'arcs concentriques : on observe alors des **éventails striés**.



**Festons réguliers
le long de l'ellipse E**



**Disposition des ellipses en festons
et arcs d'hyperbole convergeant
en éventails.**

figure 9 : festons et éventails

La texture en mosaïque caractérise les phases SB ou SG. Elle est composée de plages homogènes délimitées par des lignes de discontinuité très nettes. Enfin, pour observer des extinctions roulantes chez les smectiques, il faut des conditions particulières, notamment un refroidissement très brutal ou des traitements spéciaux des lames utilisées pour l'examen au microscope polarisant.

4) Les textures des cholestériques

Il est très rare que le refroidissement d'un produit cholestérique fondu en liquide isotrope conduise spontanément à l'observation d'une texture caractéristique de l'organisation hélicoïdale. Ordinairement on observe seulement des coniques focales, beaucoup plus petites que celles des smectiques, mal résolues sur un fond grisâtre et formant une sorte de quadrillage. Un mouvement de va et vient de la lamelle fait disparaître les coniques au profit d'une plage totalement homéotrope. L'axe optique se trouve alors normal à la lame et à la lamelle, donc parallèle à la direction d'observation. Entre polariseur et analyseur croisés, cette plage homéotrope est donc noire. Par contre, en réflexion, la préparation est intensément colorée.

Pour observer des textures révélatrices de l'état cholestérique, il vaut mieux diluer le produit observé en le mélangeant avec un nématique. Sur la plage homéotrope on voit alors apparaître des fils lumineux qui tendent à se placer parallèles et équidistants. C'est la texture à plans. Souvent elle aboutit à la formation de dessins rappelant des empreintes digitales. (photo de couverture)

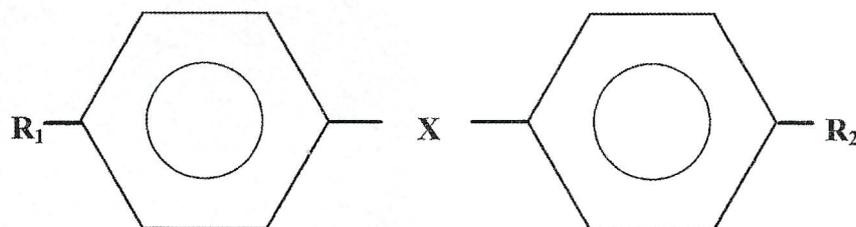
5) Textures et nature des mésophases

L'examen de la texture permet en principe de formuler des hypothèses sur la nature de la phase observée. La seule étude des textures ne peut cependant pas constituer une méthode d'identification. Des mésophases différentes peuvent donner la même texture, par exemple SB et SG avec les mosaïques. Il se produit aussi des "effets de mémoire" : lors du refroidissement d'un thermotrope, une mésophase peut conserver la texture de la mésophase qui existait plus haut dans l'échelle des températures. C'est le phénomène de *paramorphisme*.

VI - UN PEU DE CHIMIE

Pour achever la présentation générale des cristaux liquides, consacrons quelques courts instants à leur chimie. Ainsi que nous l'avons déjà indiqué, les calamitiques possèdent un cœur central rigide, en principe aromatique qui forme la hampe du roseau. Quant à la tige, elle est constituée par deux chaînes terminales, aliphatiques et souples.

Les cholestériques sont un tout petit peu plus particuliers. Ce sont des esters du cholestérol, qui est la molécule que voici. Les cycles constituant la partie centrale ne sont pas aromatiques mais leur ensemble possède en gros la géométrie d'une tige cylindrique rigide. Le tout est prolongé par deux chaînes souples, celle du cholestérol.



**R1 et R2 : Chaînes latérales souples
X : Groupe fonctionnel rigide**

figure 10 : formule générale d'une molécule donnant des cristaux liquides calamitiques

térol et celle de l'acide carboxylique qui l'a estérifié. On retrouve de la sorte la disposition calamitique.

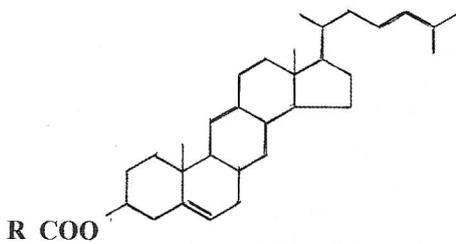
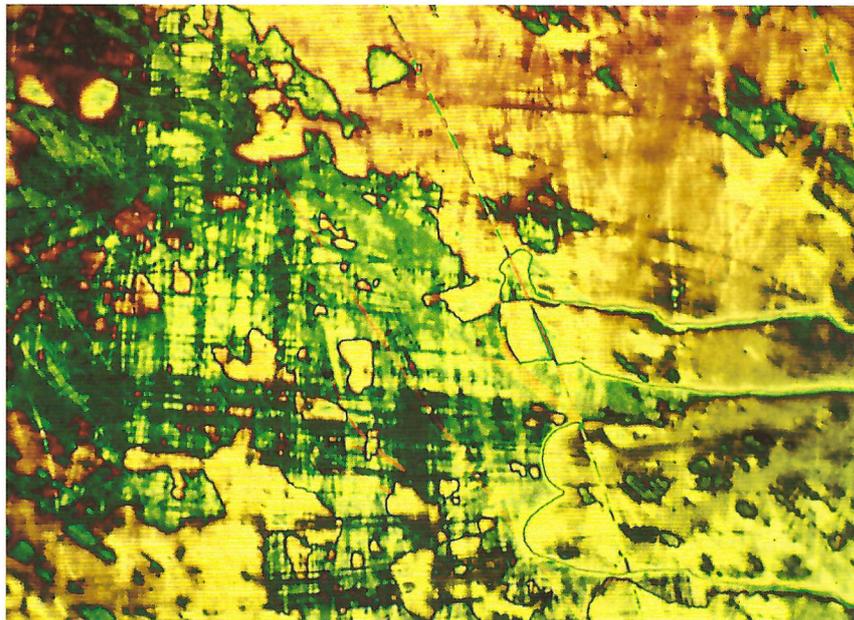


figure 11 : le cholestérol et ses esters

Et maintenant, la place aux applications !

VII - APPLICATION A L’AFFICHAGE

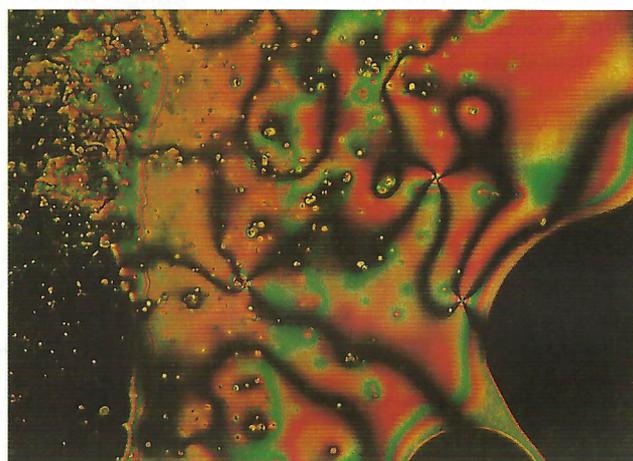
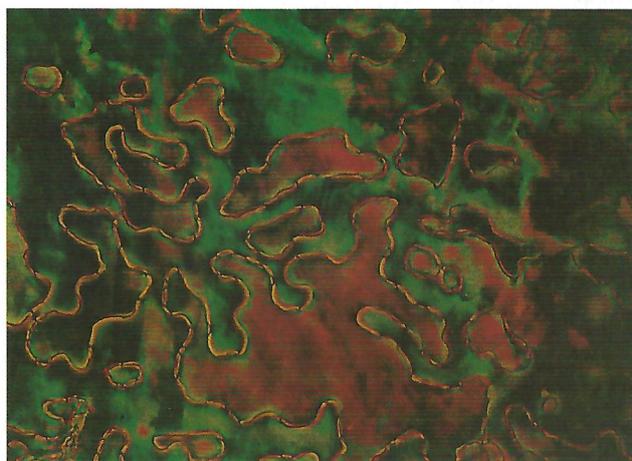
Quand on dit cristaux liquides, on entend souvent afficheurs. Examinons



▲ Nématique texture à fils.

▼ Fils lumineux dans un nématique.

▼ Nématique noyaux et extinction roulante



donc la constitution et le fonctionnement de ces dispositifs.

1) Constitution d'un afficheur

Un afficheur se compose essentiellement de trois parties.

- La cellule qui a pour fonction de transformer des signaux électriques en signaux optiques afin de faire apparaître une image par variation de lumière ou de couleur.
- Un dispositif d'éclairage et éventuellement de chauffage de la cellule
- Un système électronique de commande des points-images ou pixels.

Il existe deux méthodes possibles, l'adressage direct si le nombre des pixels est réduit, l'adressage matriciel en cas contraire.

▼ Smectique A coniques focales



8 et 9 octobre 1998 :

ACTIVITES DIVERSES

L'ADASTA et le Collège Albert CAMUS célèbrent LA SEMAINE DE LA SCIENCE sur le thème "MESURER LA TERRE"

I - L'ORGANISATION

Dès le printemps, l'ADASTA décidait de renouveler l'expérience d'une collaboration avec un collège de l'agglomération clermontoise, entreprise avec succès en 1997 au collège Joliot-Curie d'Aubières, et de travailler cette année avec le collège Albert Camus situé dans la Z.E.P. de la Croix de Neyrat à Clermont-Ferrand. Des contacts étaient établis avec le Chef d'Etablissement et Madame SARRY, Professeur de sciences physiques et une première réunion rassemblait professeurs et parents d'élèves le 26 mai pour affiner le projet.

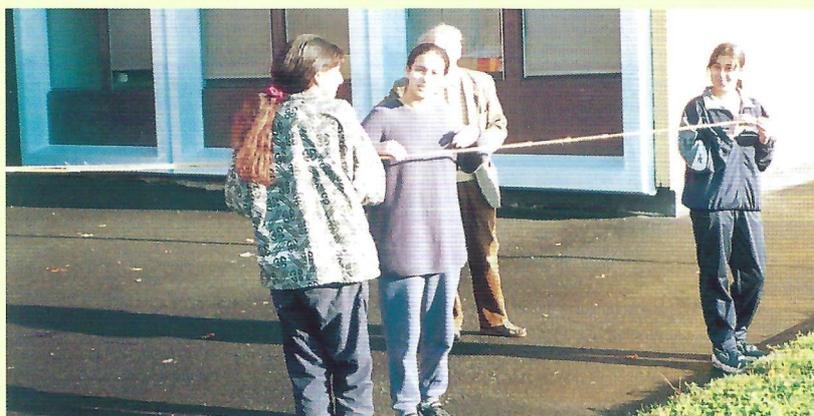
Celui-ci comprenait d'abord une exposition "La Figure de la Terre" provenant du Palais de la Découverte et propriété de l'ADASTA, formée d'une trentaine de panneaux. Elle était installée au CDI du Collège et ouverte sans interruption du 30 septembre au 10 octobre, ce qui a permis à tous les élèves du Collège de la visiter, le plus souvent en compagnie d'un professeur. Elle a accueilli des parents d'élèves dans la soirée du 9 octobre.

Les jeudi 8 et vendredi 9 octobre les 16 classes de 5ème, 4ème, 3ème et SEGPA (section d'enseignement général et professionnel adapté) se sont succédé de 7h45 à 17h30 (15 à 20 présents par classe) pour des séances d'une heure dans deux salles contiguës et dans la cour quand le temps l'a permis (pluie intermittente le jeudi, soleil le vendredi). Quelques parents d'élèves ont participé à un

débat le jeudi et le vendredi de 18h à 19h. Chaque séance était encadrée par le professeur de la classe, par Madame SARRY et par trois membres de l'ADASTA.

II - DEROULEMENT D'UNE SEANCE

Chaque séance débute par un débat animé sur la forme de la terre, la



Mesure de la distance de 2 poteaux de la cour. Relevé des 20 mesures en mètres dans l'ordre chronologique

(1) 29,67	(6) 27,63	(11) 27,63	(16) 27,37
(2) 29,71	(7) 27,68	(12) 27,66	(17) 27,67
(3) 29,67	(8) 29,75	(13) 27,63	(18) 27,67
(4) 29,66	(9) 27,63	(14) 29,73	(19) 27,65
(5) 27,83	(10) 25,66	(15) 27,62	(20) 27,68

Remarques (1) (2) (3) (4) (8) (10) et (14) comportent manifestement une erreur systématique sur le décompte des reports du double-mètre. Les 4 dernières mesures sont meilleures car nous avons invité les élèves à opérer plus soigneusement et à mieux s'organiser.

Si nous corrigeons cette erreur systématique, nous obtenons 20 mesures comprises entre 27,37 et 27,75 avec un mode de 27,66, une médiane de 27,67, une moyenne de 27,66 et un écart-type de 0,08.

Si nous ne prenons pas en compte la mesure (5) peu soignée et la mesure (16), erronée sans doute par lecture à l'envers du dernier double-mètre, il reste 18 mesures de moyenne 27,668 et d'écart-type 0,033

On peut donc retenir une distance de $27,67 \pm 0,03$ mètres soit une erreur relative de 1%

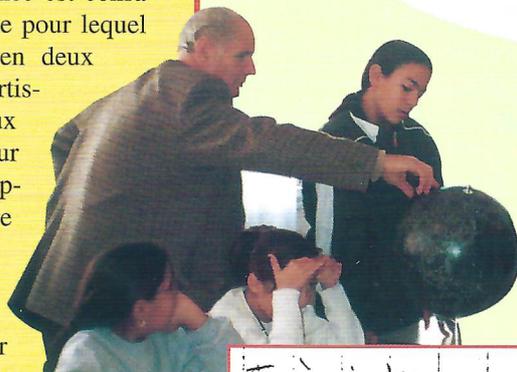
mesure de son rayon, le repérage par les méridiens et les parallèles, les cartes et leurs échelles, le rôle des satellites dans le développement des télécommunications, le système GPS (cf "Auvergne Sciences" N° 35 décembre 95 et N° 41 mars 98).

Durant cette discussion à laquelle tous les élèves participent, il apparaît qu'ils ont, avec le vocabulaire et les outils techniques propres à leur niveau, de bonnes connaissances tant dans l'histoire des grandes explorations (Christophe Colomb, Magellan) que dans la définition des coordonnées géographiques (pôle, équateur, Greenwich). En mathématiques, ils savent que deux angles d'un triangle plan déterminent le troisième et sont tout étonnés qu'il n'en soit pas de même sur la sphère où l'on peut tracer des triangles à la fois rectangles et équilatéraux ! Ils ont vu des cartes à différentes échelles mais ont des difficultés à manipuler les puissances de 10 dès qu'elles dépassent 3 : à la question "sur une carte au cent-millième que représente sur le terrain une distance d'un centimètre sur la carte", les réponses spontanées varient de 1 mètre à 100 kilomètres ! Il y a dans chaque classe de très bons élèves qui entraînent les autres avec beaucoup de dynamisme et de chaleur.

III - LES TRAVAUX PRATIQUES

L'essentiel de la séquence est consacré à un travail pratique pour lequel la classe est divisée en deux groupes de 10 se répartissant eux-mêmes en deux ou trois équipes. (Pour plus de détails cf le supplément pédagogique N°25 (Mars 1998) d'"Auvergne Sciences")

Le premier travail consiste à déterminer avec précision la latitude et la longitude du collège à partir d'un plan de Clermont d'échelle 1/12500 sur lequel il figure et où les élèves peuvent le trouver à partir du nom des rues du quartier, et d'une carte au 1/50 000 où il faut d'abord le situer



du 5 au 11 octobre 1998



La Semaine de la Science

programme Auvergne

organisée par le Ministère de l'Éducation Nationale, de la Recherche et de la Technologie

Le 8 et 9 octobre 1998
de 9 h à 12 h et de 14 h à 17 h

Collège Albert-Camus
Rue du Sous-Marin Casabianca

Mesurer la terre (hier et aujourd'hui)

- Exposition de panneaux montrant en particulier la mesure du méridien de Paris à travers l'Auvergne et le Limousin.
- Visite commentée par les animateurs de l'ADASTA (Association pour le Développement de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne).
- Ateliers.

J'ai trouvé ça très intéressant
cela nous a appris
si c'était super
faire des mesures de

La science
Je trouve que
nous apprenons
travailler et
résultats p

De trouver que c'est
apprendre comment
distance et de
avant de satellite
Et ensuite se rep

Il a
que
détaillé
c'était

J'ai trouvé cela très intéressant
permet de revoir certains
nous apprenons des choses
connaissais pas.

Très intéressant et surtout très instructif et de
passionnant surtout les expériences que l'on fait
dans la classe. Et je pense que les gens sont très sy
que car ils se sont déplacés exclusivement pour n

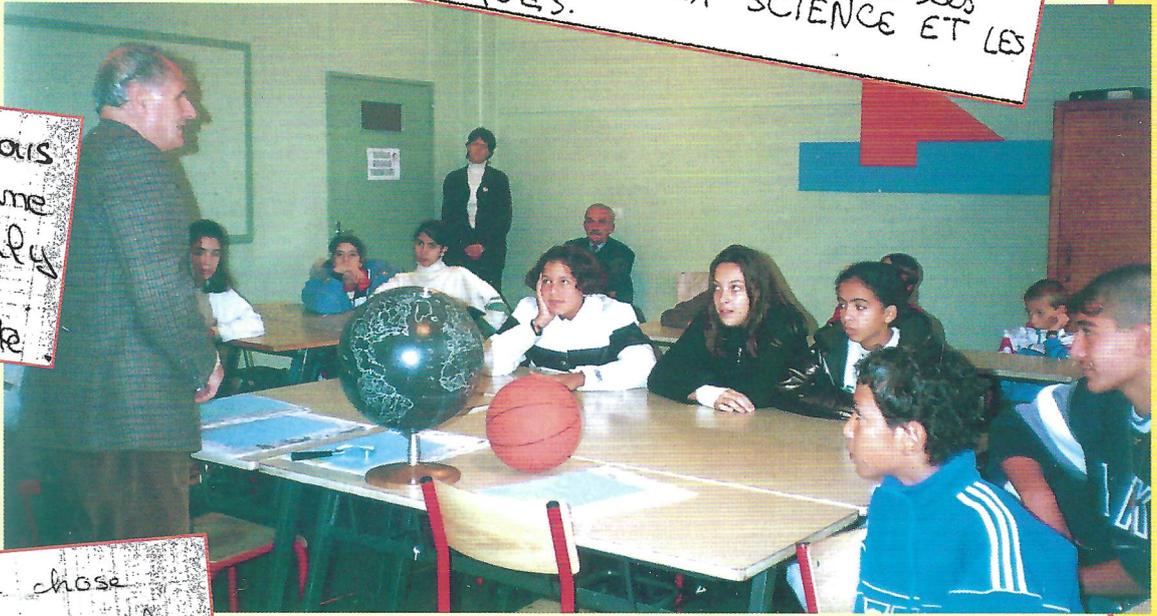
très intéressant,
très beau coup de choses
!! surtout quand on a
dans la cœur.

c'est bien
on a parler de la science
c'est pas on n'arrête et hors géographique
Domage qu'on est pas rester longtemps

semaine de la sciences
c'est bien, que cela
nous des choses; qu'il fallait
en équipes et voir nos
sur rapport avec autres.

C'est bien, sa nous a permis de se
reperer sur une carte. Nous savons
maintenant la longitude et la latitude sur une
carte. Je ne vous dit pas que j'arrive
à recalculer la longitude et la
latitude du collège mais sa nous
a fait voir comment calcul les
scientifiques. VIVE LA SCIENCE ET LES
SCIENTIFIQUES.

c'était bien de mais
ment mesurer une
situe combien il y
autour de nous
ensemble sur un carte.



explique la même chose
le professeur, mais en plus
c'est
bien.

Que penser-vous de Pascien
Je pense que se cours à bien été organisé et il nous a bien
expliqué l'histoire sur Pascien, sur le globe terrestre,
sur les méridien etc...
et nous avons eu du centre là où il faut remarquer
le collège Abdel Camus.

sant. Cela nous a
nos choses et de
choses que l'on ne

plus
avoir fait
sympati-
vous

Je trouve que c'est très bien de faire ça. On nous
apprend un peu de géographie, de mathématiques et de
sciences physiques.



Hauteur maximum du Soleil le 9 Octobre 1998 au Collège A. CAMUS.

Nous avons relevé sur le sol de la cour l'ombre au soleil d'un bâtiment du collège de 13h à 13h50

En traçant avec une ficelle un arc de cercle centré sur l'arête verticale nord de ce bâtiment, nous avons constaté que la longueur de l'ombre est minimum entre 13h30 et 13h40. Nous avons mesuré cette longueur avec nos doubles-mètres et obtenu 18,15 mètres. Par ailleurs nous avons mesuré la hauteur du bâtiment, accessible par un escalier extérieur et obtenu 13,60 mètres. Les élèves de 3ème peuvent avec leur calculette en déduire la hauteur θ du soleil par la formule

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{13,6}{18,15} = 0,749 \text{ d'où } \theta = 36^{\circ}52'$$

Les autres élèves peuvent construire sur du papier millimétré un triangle rectangle ABC dont les 2 côtés de l'angle droit \hat{B} mesurent AB = 136 millimètres et BC = 181,5 millimètres et mesurer au rapporteur l'angle BAC trouvant une valeur proche de 37° .

En consultant des tables astronomiques on trouve que le passage au méridien de Clermont a lieu le 10 octobre à 13h35 heure légale et que la hauteur du soleil est de $37^{\circ}37'$.

L'erreur absolue est donc de 45' soit une erreur relative de 2%

Celle ci s'explique par la rusticité de la mesure mais aussi

- par le fait que le diamètre apparent du soleil est de 32'
- par le fait que le sol de la cour présente une légère pente de l'ordre de 0,5%

Rappelons qu'Eratosthène avait obtenu (à Alexandrie le jour du solstice d'été) $82^{\circ}48'$ au lieu de $82^{\circ}15'$.

exactement par comparaison avec le plan. La carte contient le tracé de quelques méridiens et parallèles et, sur ses bords, des échelles de latitude et de longitude. Les élèves doivent donc aussi soigneusement que possible tracer le parallèle et le méridien du collège puis interpoler linéairement entre les valeurs de l'échelle.

Ils obtiennent comme latitude $45^{\circ}48,3$ minutes nord, longitude $3^{\circ}6,5$ minutes est.

Le second travail (cf encadré p. I) consiste à mesurer la distance entre

deux lampadaires de la cour portés par des poteaux métalliques ayant quelques centimètres de diamètre. On précise donc qu'il s'agit de la distance entre 2 croix marquées à la craie sur ces poteaux à 1 mètre environ au-dessus du sol. Les élèves, par équipes de 5, disposent d'une pelote de ficelle pour matérialiser le segment de droite qui joint les deux croix et de plusieurs doubles-mètres pliants en bois du commerce. Ils sont donc, à la distance mesurée et à la longueur de la perche près (2 m au lieu de 3,90 m) dans les

conditions de la mesure d'une base de triangulation sur le terrain au XVII^e ou au XVIII^e siècle qu'ils ont pu voir représentée par des gravures de l'exposition. Les doubles-mètres doivent être mis soigneusement bout à bout : chacun est porté par deux élèves qui se déplacent alternativement ; le cinquième est chargé de compter les reports et de vérifier les contacts.

La troisième tâche, effectuée elle aussi dans la cour, consiste à lire directement latitude et longitude sur deux récepteurs GPS (l'un de bateau, l'autre, plus léger, de marcheur) disposés en un point bien dégagé. En apparence chaque coordonnée est donnée en degrés, minutes et millièmes de minutes mais si on observe les appareils pendant une demi-heure, on constate rapidement qu'ils ne donnent pas tous les deux la même indication et que leur affichage varie dans un intervalle d'amplitude 0,2 minute. Une moyenne des mesures affichées pendant un quart-d'heure permet d'atteindre une précision de 0,1 minute soit à peu près 200 mètres mais pas mieux. (Jusqu'à maintenant, les militaires se réservent la précision du millième de minute).

Nous avons prévu de réaliser la dernière mesure le jeudi et le vendredi ; malheureusement il n'y a eu du soleil que le second jour. Il s'agissait, comme Eratosthène à Alexandrie à la fin du III^e siècle avant notre ère, de mesurer la hauteur maximum du soleil un jour donné. (cf encadré ci-contre).

V - CONCLUSION

Nous devons souligner la parfaite organisation de ces deux journées par le personnel de l'établissement et la grande ouverture de tous les enseignants. Le succès de ces journées, riches, denses et animées se mesure aux échos recueillis chez les élèves (cf pages centrales).

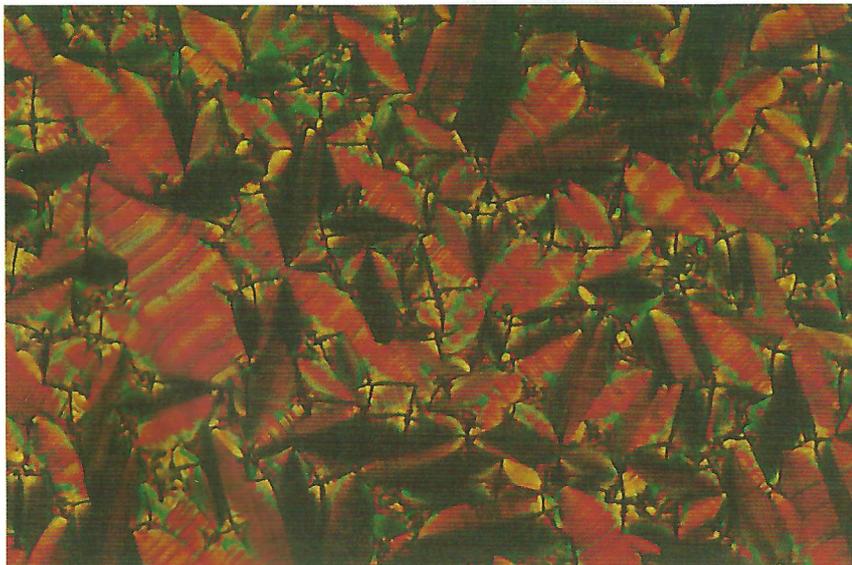
Remercions tous les acteurs et en particulier le principal du Collège Albert Camus, Monsieur TURGIS, et Madame SARRY, infatigable cheville ouvrière du projet.

P. L. HENNEQUIN

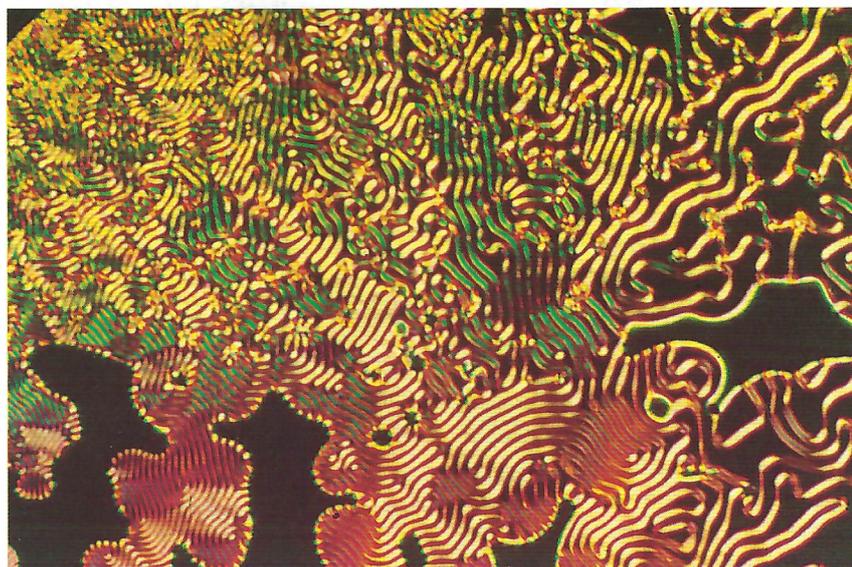


▲ Smectique B mosaïque

Smectique E coniques striées ▼



▼ Cholestérique texture à plans



En adressage direct, chaque pixel est commandé individuellement par des contacts extérieurs. En système matriciel, chacun se trouve à l'intersection de deux réseaux de conducteurs transparents orthogonaux, les lignes et les colonnes. Les colonnes sont alimentées en continu alors que les lignes le sont de façon séquentielle. Lorsque la tension résultante dépasse un certain seuil, on observe un changement de lumière résultant du changement d'orientation moléculaire induit par le champ électrique. L'incorporation d'un colorant donne au pixel la couleur souhaitée.

2) Les différents types d'afficheurs

Les cellules sont finalement des dispositifs capables d'exister sous deux états, l'un transparent et l'autre opaque. La commutation s'effectue essentiellement selon l'un ou l'autre de trois procédés : la diffusion, l'absorption ou la polarisation de la lumière.

a) Les cellules à diffusion

Elles exploitent le fait qu'un milieu avec agitation et orientation aléatoires de ses molécules est fort diffusant alors qu'un alignement rigoureux lui confère une transparence beaucoup plus grande. Ceci étant, différentes méthodes permettent de passer de l'état aligné à l'état turbulent et vice-versa. Ainsi une cellule parfaitement homéotrope apparaît bien transparente. Si on la soumettait à un champ électrique intense, on ne ferait que changer la direction d'alignement au profit de celle du champ. Mais en appliquant un champ "intermédiaire" on se contente de détruire l'alignement homéotrope sans encore réaligner. On a de ce fait un milieu turbulent peu transparent. Dans le même ordre d'idées, on peut créer les turbulences par déroulement d'hélices cholestériques. Une technique plus récente consiste à enfermer des capsules de cristal liquide dans une matrice polymérique. Les murs des capsules provoquent un arrangement aléatoire et l'application d'un champ, suffisamment élevé cette fois, amène à l'alignement.

b) Les cellules à absorption

Elles sont remplies d'un colorant dichroïque "invité" chez un cristal

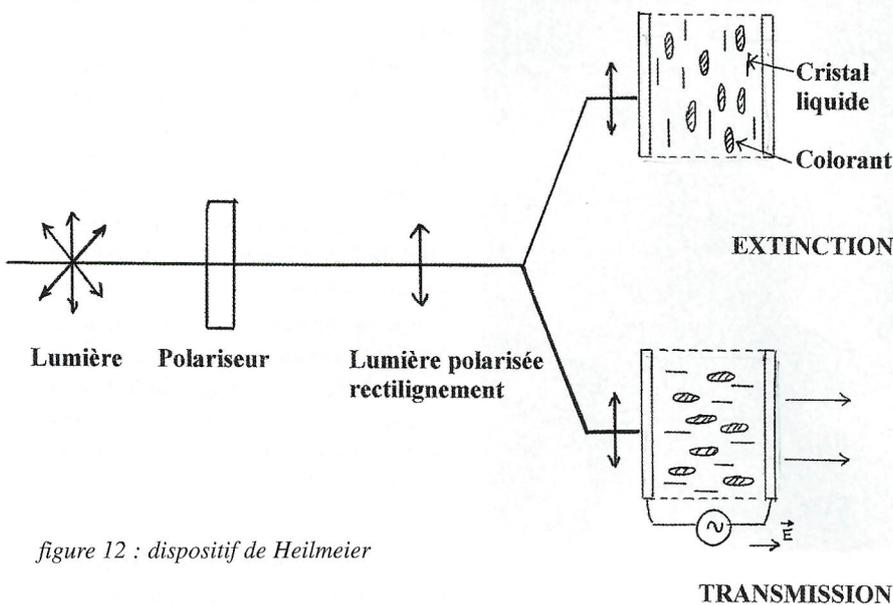


figure 12 : dispositif de Heilmeyer

liquide "hôte". Le dichroïsme est une propriété liée au phénomène de polarisation de la lumière. Disons que les molécules absorbent de façon très sélective une lumière polarisée parallèlement à leur grand axe et laissent passer facilement un vecteur lumineux perpendiculaire. Les cristaux liquides dissolvant le colorant imposent leur propre orientation aux molécules dissoutes. En les faisant changer d'orientation, on provoque donc aussi le changement de direction absorbante et on parvient à commuter, peut-être pas de transparent à opaque, mais au moins de transparent à très absorbant. Les cristaux liquides hôtes peuvent être de nature nématique ou cholestérique.

Dans le montage simple de HEILMEIER, la cellule reçoit de la lumière polarisée rectilignement et se comporte en analyseur. Selon l'organisation imposée aux dichroïques par les cristaux liquides, elle est en situation parallèle ou croisée et transmet ou éteint. Le double montage de UCHIDA recrée quant à lui le classique couple polariseur-analyseur. Il économise le polariseur mais demande deux cellules au lieu d'une.

Avec un cristal liquide cholestérique, une seule cellule suffit, sans utiliser de polariseur : c'est le dispositif de TAYLOR et WHITE. Au repos, l'organisation hélicoïdale s'est aussi instaurée chez les colorants. Cela veut dire que l'on trouve dans la cellule un nombre important de molécules pré-

sentant toutes les orientations possibles en fait de direction absorbante. Au bout d'une certaine épaisseur aucune lumière ne peut être transmise. Par contre, en déroulant les hélices on déroule les absorbeurs et le passage de la lumière redevient possible.

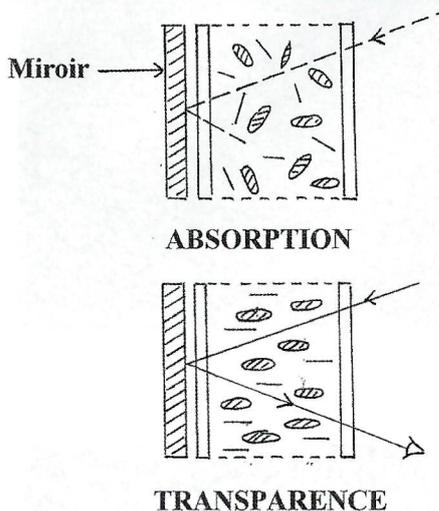


figure 13 : dispositif de Taylor et White

c) Les cellules utilisant la polarisation de la lumière

Elles sont de deux types, à nématique torsadé ou à cristal liquide ferro-électrique.

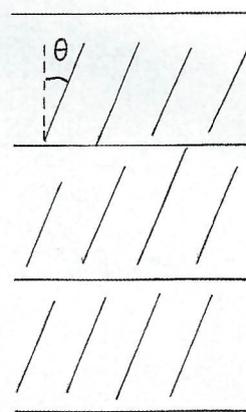
La cellule à nématique torsadé enferme un nématique entre deux plaques transparentes, provoquant l'une un alignement homogène et l'autre un alignement homéotrope. De la sorte les axes des molécules de ce nématique tournent de 90° d'une paroi à

l'autre. Recevant de la lumière polarisée rectilignement, ce milieu va entraîner le vecteur-polarisation dans sa rotation. On s'arrange alors pour le recevoir sur un analyseur parallèle avec lui : la lumière passe et la cellule est éclairée. Si maintenant on applique un champ électrique assez intense, ses effets d'alignement détordent le nématique. Le vecteur-polarisation ne tourne plus et il rencontre l'analyseur croisé avec lui. La cellule est donc éteinte.

Pour comprendre le fonctionnement des cellules à cristaux liquides ferro-électriques, il suffit de savoir que le fait de porter des moments dipolaires électriques couplés d'une certaine façon conduit ces produits à former

Phase S_C classique :

smectique incliné



Phase S_C* chirale :

organisation hélicoïdale

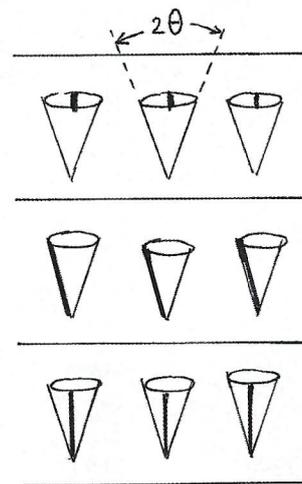


figure 14 : phases smectiques S_C et S_C*

une mésophase spéciale, la SC*. Tout comme pour une phase SC ordinaire, les molécules sont penchées d'un angle sur les plans des couches. Seulement, en plus, elles prennent une disposition hélicoïdale. Dès lors le fonctionnement de l'afficheur se ramène à un problème de déroulement de ces hélices et au fait de savoir si la lumière polarisée rencontrera un milieu avec ou sans torsion.

VIII - THERMOMETRIE ET AIDE A L'ANALYSE OU A LA CARACTERISATION

1) Thermométrie avec cristaux liquides cholestériques

La résolution des équations de Maxwell dans un milieu cholestérique conduit, pour une longueur d'onde égale au pas de l'hélice, à une impossibilité totale pour une onde électromagnétique de se propager. Elle subit donc une réflexion totale de la part du cristal liquide. Le pas des hélices cholestériques se situant dans le domaine des longueurs d'onde des radiations visibles, cette réflexion sélective donne une très intense coloration avec la pureté des couleurs interférentielles.

On peut éviter le recours aux équations de Maxwell et modéliser le cholestérique par un schéma équivalent beaucoup plus simple donnant lui aussi les réflexions sélectives. "Tout se passe comme si" le cristal liquide était une stratification de miroirs semi-transparents équidistants d'un demi-pas de l'hélice. On obtient alors la condition de réflexion en cherchant des interférences constructives entre les différents rayons réfléchis.

Pour les cholestériques, le pas de l'hélice est variable avec la température. La couleur est donc révélatrice de la température à laquelle se trouve le matériau. Ce fait peut être mis à profit pour des mesures thermométriques. Je vais un peu parler des applications à l'électronique ; il en existe dans quantité d'autres domaines, notamment celui de la médecine.

2) diagnostic et caractérisation des composants.

La définition et la mesure de la quali-

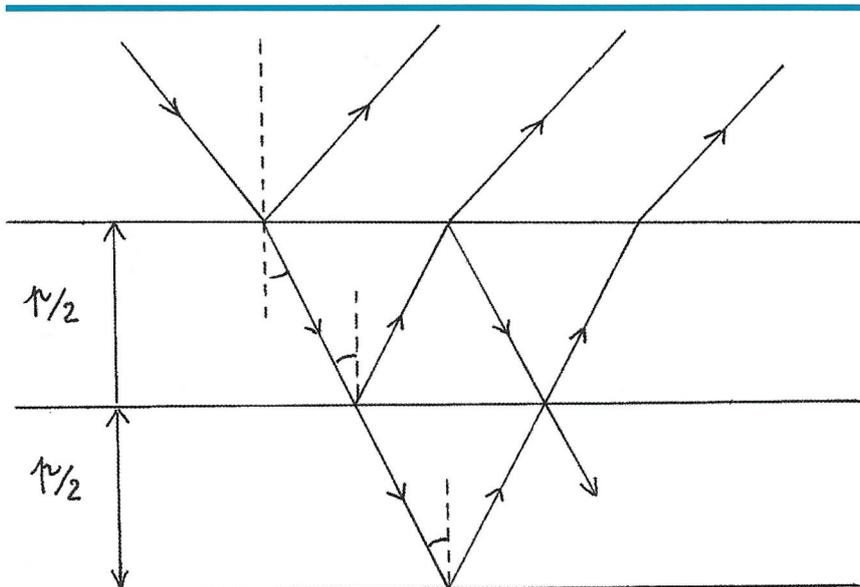


figure 15 : modèle simplifié d'un cristal liquide cholestérique assimilé à une stratification de miroirs parallèles équidistants d'un demi-pas d'hélice

té de composants à très haute échelle d'intégration deviennent délicates en raison de leur extrême complexité. Les mesures ne peuvent qu'être indirectes et les cristaux liquides y occupent une place prépondérante. Ils interviennent au niveau de l'analyse fonctionnelle qui permet de localiser une zone responsable d'un défaut et de l'analyse de défaillance qui permet de relier un défaut électrique à un défaut physique. On peut les utiliser dans des thermographies de la surface du composant : les échauffements révèlent des plages à intensité anormale.

En fait les cristaux liquides offrent à l'électronique bien d'autres possibilités que la thermographie. Par exemple les changements d'alignement et les éventuelles turbulences provoquées par les champs électriques mettent parfois directement en évidence les défauts d'isolation ou de métallisation. On peut même amener des badiageons de cristaux liquides à s'orienter ou se désorienter d'une manière assez savante pour dessiner les équipotentielles de certains dispositifs. Toutes ces techniques d'analyse sont fiables, non destructives et peu coûteuses.

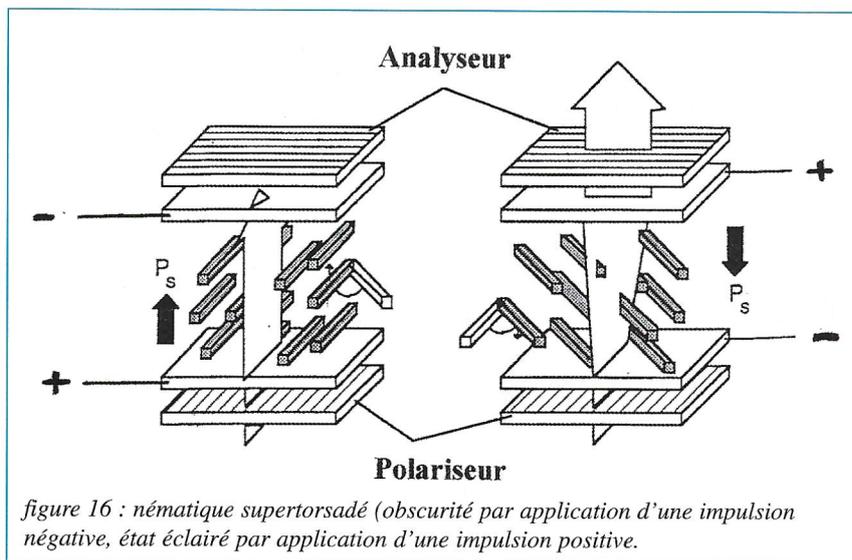
IX - DEVELOPPEMENTS FUTURS

1) les écrans plats

A l'époque où se sont multipliés les

appareils avec écran, on craignait beaucoup le risque d'implosion, d'où la recherche de technologies autres que le tube cathodique. Ce dernier reste sans concurrents sérieux dans le domaine de la télévision à cause des facilités de balayage. Par contre les recherches sur les écrans plats se sont poursuivies avec des objectifs de diminution de l'encombrement et réduction de la consommation d'énergie. Les cristaux liquides sont pour beaucoup dans les résultats positifs, principalement au Japon.

Les afficheurs à nématique torsadé ne peuvent guère dépasser quelques dizaines de lignes car la variation de la torsion de l'hélice entre les états adressés et les états non adressés diminue si le nombre de lignes augmente trop. Cela a induit l'apparition de dispositifs plus sophistiqués, les configurations nématiques super-torsadées. On les obtient en "dopant" le nématique destiné à subir la torsion par l'incorporation d'un cholestérique. Leur fonctionnement est un problème de vibrations elliptiques. Ils donnent un bien meilleur contraste et offrent la possibilité de commander chaque pixel par un transistor à effet de champ. On dit alors que l'afficheur (ou l'écran) est à matrice active.



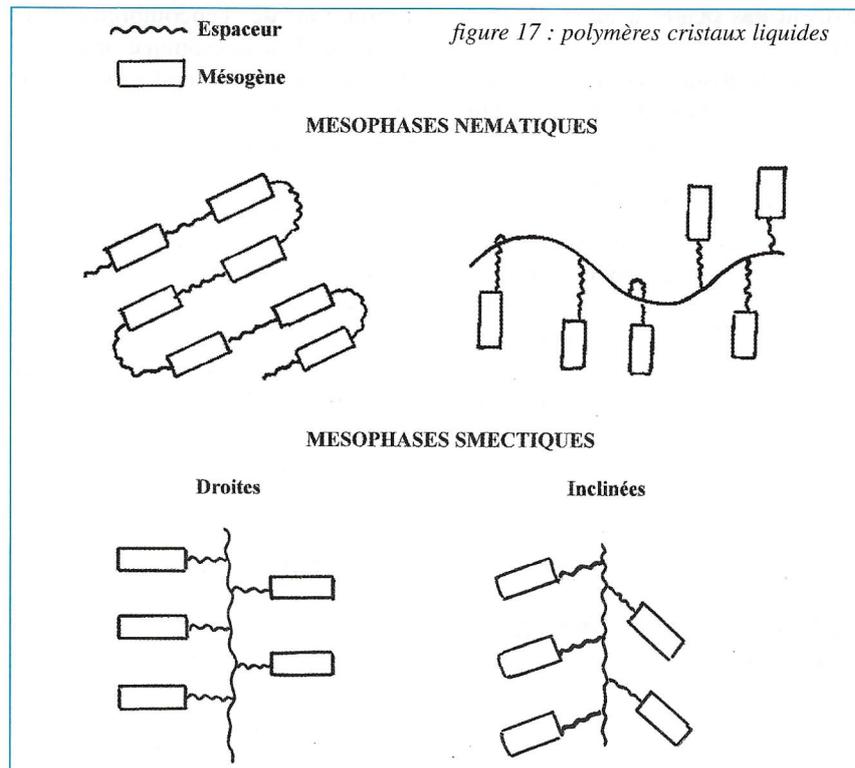
2) Les cristaux liquides dans le monde des polymères.

Les polyméristes ont rapidement constaté que la qualité d'un polymère dépend beaucoup du milieu dans lequel il se forme. De là est née l'idée de la polymérisation en phase orientée. Le monomère est dissous dans un nématique. Les propriétés mécaniques des chaînes qui grandissent dans ce milieu en sont bien améliorées.

Ensuite est venue l'idée de faire des polymères eux-mêmes mésomorphes, d'abord des lyotropes comme le

célèbre Kevlar de Dupont de Nemours puis des thermotropes.

La synthèse de polymères cristaux liquides est devenue possible le jour où l'on a su découpler les mouvements de tronçons correspondant à des coeurs de calamitiques des mouvements des chaînes macromoléculaires. Cela est possible par l'entremise de segments souples, les espaceurs. Différents arrangements sont possibles, en chaîne, en peigne ou mixte. Ils conduisent à différents types de mésophases pouvant offrir une assez grande richesse d'organisation.



VOCABULAIRE

- mésomorphe : de forme intermédiaire
- mésophase : état intermédiaire d'organisation de la matière.
- lyotrope : dont l'organisation varie en fonction d'une concentration en solvant
- thermotrope : dont l'organisation varie avec la température.
- nématique [grec nema = fil] : à grands axes moléculaires alignés
- smectique [grec smegma = savon] : à arrangement lamellaire
- cholestérique : nématique avec arrangement hélicoïdal
- alignement homogène : parallèle au support
- alignement homéotrope : perpendiculaire au support.
- dichroïsme : inégalité d'absorption (selon la direction de polarisation) des ondes électromagnétiques.

MESOPHASES ET LEURS TEXTURES CARACTERISTIQUES

- nématique :
Fils, noyaux et extinctions roulantes
- smectique A :
Coniques focales et éventails
- smectique B :
Mosaiques ; stries fugaces lors de la transition $S_A - S_B$
- smectique C :
Eventails striés ; extinctions roulantes
- smectique E :
Eventails striés
- smectique G :
Mosaiques
- cholestérique :
petites coniques focales ; texture à plans (rarement spontanée)

L'esthétique des Ponts

Anne BERNARD-GELY
et Jean-Armand CALGARO

anciens élèves
de l'Ecole Polytechnique,
Ingénieurs des Ponts et Chaussées

Dès les premières esquisses, l'ingénieur doit se préoccuper de l'aspect de son ouvrage. Cela devrait être une évidence. Autrefois, la conception des ponts en maçonnerie relevait d'un véritable projet d'architecture.

Mais au XIX^e siècle, avec le développement de la construction métallique, de graves accidents se produisirent et le souci dominant des ingénieurs fut de construire des ponts résistants (par exemple, ponts à triangulations lourdes et enchevêtrées). La lourdeur de ces structures a provoqué vers 1850 une attaque virulente et systématique du goût des ingénieurs.

Dès le début du XX^e siècle, les ingénieurs commencèrent à se rendre compte que si les ponts devaient être résistants, ils devaient aussi être esthétiques. Séjourné écrivait en 1914 : "De tous les ouvrages - je dis de tous, même des petits - l'aspect importe : il n'est pas permis de faire laid".

Cette préoccupation est devenue nécessité. Les ponts ont toujours attiré l'attention de tous leurs spectateurs : artistes, poètes ou chanteurs (la poésie, la littérature ou les journaux abondent de références aux ouvrages d'art), mais aussi le public. La qualité technique d'un ouvrage ne peut être appréciée que par des spécialistes alors que la qualité esthétique peut l'être par tous ; le critère architectural constitue la seule possibilité de jugement d'un pont pour la plupart des personnes.

Cet article est le deuxième chapitre d'un cours sur la Conception des Ponts, enseigné par les auteurs à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Le premier chapitre "Une brève histoire des ponts", est paru dans AUVERGNE-SCIENCES N°40 (Novembre 1997).

"L'esthétique des ponts est liée à la clarté, à la lisibilité de la conception, à la pureté des lignes générales, à l'aspect des surfaces vues (notamment, pour les ponts métalliques, à la couleur de la peinture et à la simplicité des assemblages), aux jeux du soleil, de la lumière artificielle et de l'ombre, à l'adaptation de l'ouvrage à son site. Le pont doit ajouter un ornement à son environnement, qu'il s'agisse d'un paysage ou d'un décor urbain."

(Grand Dictionnaire
Encyclopédique Larousse)

Ni la réalisation d'un exploit technique d'ingénieur, ni la recherche de l'économie à tout prix ne peuvent justifier qu'on enlaidisse villes et paysages. Projeter des ouvrages qui soient réellement des ouvrages d'art doit être une préoccupation essentielle de l'ingénieur.

I - OUVRAGES D'ART ET ENVIRONNEMENT

D'une manière générale, les préoccupations d'environnement ont été prises en compte, depuis de nombreuses années, dans les projets publics ou privés d'aménagements et de travaux. L'article 2 de la loi du 10 juillet 1976, relative à la protection de la nature a institué l'obligation de réaliser une étude d'impact (à la charge du maître d'ouvrage, selon l'article 1 du décret d'application du 12 octobre 1977) dans le cadre global des études préalables à la réalisation d'aménagements ou d'ouvrages qui, par l'importance de leurs dimensions ou leurs incidences sur le milieu naturel, peuvent porter atteinte à ce dernier. La méthodologie pratique d'établissement des études d'impact est précisée dans la circulaire ministérielle du 23 janvier 1978 sans, d'ailleurs, aborder précisément les questions relatives aux ponts. Cette circulaire rappelle qu'une étude d'impact constitue la formulation explicite de la place donnée aux contraintes d'environnement, contraintes qui doivent être placées sur le même plan que les

contraintes techniques ou économiques. La directive CEE du 27 juin 1985, relative à l'évaluation des incidences de certains projets publics ou privés et applicable en France depuis le 4 juillet 1988, rend obligatoire la production d'une étude d'impact pour tous les projets d'autoroutes, de voies rapides ou de voies pour trafic à grande distance. Selon cette directive, l'impact global d'un projet doit être évalué par rapport à la nécessité de protéger la santé humaine et les conditions de vie, et de préserver la capacité de production à long terme des milieux concernés.

Les problèmes relatifs à la qualité paysagère et architecturale des ouvrages routiers sont traités dans une circulaire ministérielle en date du 24 septembre 1984. Cette circulaire insiste sur le fait qu'aucune décision quant à la qualité paysagère et architecturale des ouvrages routiers ne doit être prise sans une connaissance suffisamment approfondie du contexte, connaissance basée sur une analyse du site (caractère des espaces, perception de l'ouvrage, potentialités en aménagement, satisfaction du public, etc.). C'est à partir de cette analyse du site et d'une réflexion sur le projet qu'une décision d'intervention plastique est prise, avec un degré d'intention plus ou moins fort, aboutissant aux choix de l'objectif paysager et architectural dès le stade de l'étude

Le vieux pont de Saint-Floret sur la Couze Pavin (Puy-de-Dôme).



préliminaire. Nous renvoyons le lecteur au texte de cette circulaire pour la définition détaillée et les conditions de choix des divers objectifs architecturaux.

La circulaire du 5 mai 1994 de la direction des Routes, relative aux modalités d'instruction des dossiers techniques pour les opérations d'investissements routiers, reprend les idées majeures des deux circulaires précédemment citées. Elle décrit, en particulier, la consistance minimale d'une étude préliminaire d'ouvrage d'art vis-à-vis des problèmes d'environnement :

- établissement d'un programme précisant l'ensemble des contraintes, en particulier les contraintes esthétiques (qualité du site et de l'environnement, site classé, etc.) ;
- choix du parti (analyse des solutions envisageables) en proposant l'adoption d'un objectif architectural.

Pour les ouvrages non courants, il est précisé : "Si le site est sensible ou si une recherche architecturale poussée est nécessaire, l'adjonction de documents graphiques, de photomontages doit être prévue."

En effet, contrairement à l'objet d'art qui a une beauté intrinsèque, un pont ne saurait être dissocié de son environnement, dont il fait partie intégrante. Il est donc indispensable que l'auteur du projet connaisse bien le site dans lequel l'ouvrage sera placé

et en tienne compte au niveau de la conception.

La préoccupation de l'aspect doit toujours être présente au cours de l'étude de l'ouvrage, jusqu'au niveau de l'exécution. Ce serait, en effet, une grave erreur de penser qu'il suffit de quelques aménagements partiels et tardifs (corniche, garde-corps...), ou d'une décoration surajoutée, pour essayer de rendre plus beau ou simplement convenable un projet dont les formes générales ne seraient pas harmonieuses au départ : ce sont les grandes lignes du pont qui commandent l'impression plus ou moins agréable qu'il produira, ce qui n'exclut pas la nécessité d'en étudier avec soin tous les détails.

2 - INGENIEURS ET ARCHITECTES

Une structure bien conçue ne doit pas seulement satisfaire aux critères de sécurité, mais doit également être économique et cohérente avec un programme fonctionnel et expressif, c'est-à-dire un programme architectonique. Si la sécurité est indispensable, l'économie et la qualité architecturale sont les objectifs les plus importants d'un projeteur talentueux.

Sur un plan philosophique, on ne peut qu'être étonné par les méthodes employées pour l'élaboration des projets, méthodes qui confinent l'emploi d'instruments rationnels au seul processus de vérification, tandis que l'invention de la forme relève d'actes de conception seulement assistés par l'intuition et l'expérience. Nous savons prendre en compte, en phase de vérification, le comportement rhéologique des matériaux, les effets des variations de température, la nature probabiliste des conditions de chargement, la nature partiellement aléatoire des réserves de résistance des matériaux ou la déformabilité des liaisons, mais nous manquons d'une méthodologie, avec un niveau même lointainement comparable à celui avec lequel nous effectuons les vérifications, lorsqu'il s'agit d'effectuer les choix de base. Quand il faut prendre les décisions initiales dont dépend la

quasi totalité du résultat, nous sommes à peu près dans la même situation qu'un architecte de la Renaissance : intuition, expérience, sens statique, mais peu d'outils pour rationaliser des décisions dans un domaine que nous contrôlons et dans lequel la liberté de choix s'exerce avec conscience et responsabilité.

Ce constat explique la tendance continue des architectes et des ingénieurs, depuis la première moitié du XVIII^e siècle, à s'isoler les uns des autres dans leur propre spécialité. Cette tendance s'est surtout manifestée en France ; à l'étranger, la séparation entre ingénieurs et architectes est moins marquée, les deux professions n'étant pas (ou pas complètement) distinctes. Or, les architectes, de par leur formation, sont sensibles aux questions d'intégration, d'impact, de traitement des abords et savent souvent, mieux que les ingénieurs, établir un dialogue avec les maîtres d'ouvrages.

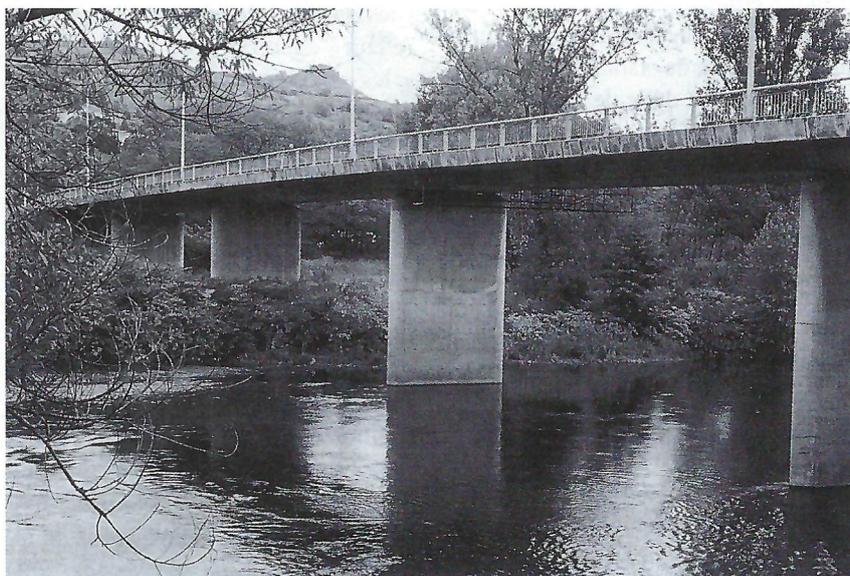
De nos jours, l'intervention des architectes dans la conception des ouvrages d'art est relativement courante. Mais les rôles ne doivent pas être confondus : l'ingénieur reste le responsable de son projet comme le souligne la lettre-circulaire ministérielle du 21 novembre 1989 relative à la qualité des études d'ouvrages d'art :

"Il doit être entendu que l'étude d'un ouvrage d'art doit être menée par un ingénieur spécialiste, de compétence proportionnée à l'importance et à la complexité de l'ouvrage, et personnellement attentif aux aspects esthétiques de la conception. Pour les ouvrages qui méritent une recherche architecturale particulière, et cela doit être systématiquement le cas pour les grands ouvrages ou les ouvrages en milieu urbain, il est nécessaire qu'un architecte soit associé à la conception dès le début de celle-ci, le spécialiste restant responsable de l'ensemble de la conception."

En fait, le problème majeur réside dans la qualité des relations qui s'instaurent entre l'ingénieur et l'architecte

afin que ce dernier puisse exprimer avec une liberté suffisante sa créativité. C'est de cette qualité que dépend la naissance d'œuvres originales, comme le pont sur le Basento (1973) en Italie, dû à l'architecte Sergio Musmeci.

Nous avons, jusqu'à présent, insisté sur le rôle potentiel de l'architecte pendant la phase de conception d'un pont. En fait, la collaboration ingénieur-architecte doit se poursuivre jusqu'à la fin de sa construction. De plus en plus fréquemment, l'architecte est associé lors du jugement des offres, à la mise au point du projet définitif avec l'entreprise adjudicataire et à la réalisation effective de l'ouvrage pour la définition de la texture des parements, pour le choix des couleurs et pour traiter les inévitables adaptations de détail.



Sur la Couze Chambon à Coudes (Puy-de-Dôme)

3 - QUELQUES REGLES ELEMENTAIRES D'ESTHETIQUE

A la question "qu'est-ce que la beauté ?" les réponses, en général, divergent entre l'opinion du philosophe anglais David Hume, pour qui la beauté passe par la sensibilité de l'homme, et celle d'Emmanuel Kant, pour qui la beauté est partie intégrante de l'objet. En fait, on peut admettre que cette opposition de tendances est

un faux problème : il n'y a pas lieu de les opposer mais de les associer : "L'observateur n'admire (subjectivement) que ce qui a certaines proportions harmonieuses (objectivement)".

Si l'on veut parvenir à porter un jugement esthétique, il faut donc se poser la question : pourquoi trouve-t-on tel ouvrage beau, ou tel autre laid ? De telles analyses nous mènent à proposer certaines règles qu'il semble nécessaire de respecter pour la création de formes harmonieuses ; mais il n'est pas possible d'arrêter des règles permanentes et universelles d'esthétique car elles sont, au moins en partie, fonction de la mode, de l'évolution de la technique et des impératifs économiques et, de plus, elles ne sont ni suffisantes, ni peut-être toujours nécessaires ; nous en citerons néanmoins quelques-unes parmi les plus

couramment admises. En les respectant, l'ingénieur fera, en général, un ouvrage acceptable et s'il y ajoute du talent, il fera un ouvrage esthétique ; cependant le respect de ces règles ne doit pas gêner son esprit créatif.

3.1 La première règle, fondamentale, concerne le rapport des dimensions.

Il est nécessaire de donner à l'ouvrage de bonnes proportions. En effet, une caractéristique importante de la

beauté d'un monument est donnée par l'harmonie de ses proportions dans l'espace : la hauteur, la largeur et la profondeur, le contraste entre surfaces pleines et ajourées ainsi que le rapport clair-obscur provoqué par l'ombre et la lumière.

Le choix des proportions n'est pas simple et dépend du caractère que l'on veut donner à l'ouvrage (robustesse, minceur...) ; les proportions ont, bien sûr, une importance très inégale selon qu'elles se rapportent à des dimensions de parties principales ou secondaires et selon la position du point de vue.

En plus des proportions entre les diverses dimensions géométriques de l'ouvrage, il est nécessaire de veiller aux proportions entre les masses de ses éléments. C'est le cas, en particulier, du rapport entre les piles et le tablier. D'une façon générale, un ouvrage doit nécessairement donner une impression de stabilité et de sécurité : il convient donc de proscrire les appuis trop grêles, susceptibles de créer un sentiment de malaise. Dans le cas de piles de grande hauteur, la prise en compte des critères de résistance (flambement) et de sécurité lors de la construction du tablier conduit généralement à leur conférer des dimensions proportionnées à celles du tablier.

Le problème est nettement plus ingrat à traiter lorsqu'il s'agit d'un tablier de grandes portées (donc relativement épais) et dont le profil en long est proche d'un terrain naturel sans relief. On peut, dans ce cas, être amené à prévoir des piles très massives qui souligneront l'impression de robustesse donnée par l'ouvrage.

La question des ouvertures sous un ouvrage, ou plus généralement du choix de la travure, est des plus importantes. D'une manière générale, les ouvertures de forme voisine du carré sont maladroites, qu'il s'agisse de petits ou de grands ponts. Certes, il n'est pas nécessaire de se référer à un quelconque nombre d'or (on rappelle qu'il est égal à

$$\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,618),$$

mais, en modifiant la répartition des travées ou en s'orientant vers un autre type de structure, le projeteur peut toujours trouver une solution conduisant à des ouvertures plus équilibrées d'aspect satisfaisant. Si, comme nous l'avons dit, une ouverture carrée est plutôt maladroite, une ouverture rectangulaire allongée dans le sens de la hauteur (cas d'un pont cadre de faible largeur ou de fort tirant d'air) est franchement disgracieuse.

3.2 La seconde règle pose en principe qu'un ouvrage ne doit pas fermer l'espace.

Selon la circulaire du 24 septembre 1984, on distingue :

- les ouvrages essentiellement destinés à s'adapter au site existant sans intention de transformer celui-ci ;
- les ouvrages destinés à constituer un élément d'un site futur ;
- les ouvrages inévitablement voués à retenir l'attention ;
- les ouvrages sur lesquels on veut attirer l'attention.

La première catégorie est principalement constituée d'ouvrages aux dimensions modestes : ils doivent en général être aussi "transparents" que possible et ne pas s'imposer. Dans le cas d'un passage supérieur d'autoroute, par exemple, où il est indispensable de dégager la meilleure visibilité pour l'automobiliste, il faut éviter la multiplication des appuis intermédiaires ou la présence de culées trop massives. On préfère donc projeter un ouvrage de portée nettement plus importante que la largeur de la plate-forme autoroutière et, si possible, sans appui sur le terre-plein central. Il sera intéressant de choisir un tablier élancé et de chercher à diminuer l'importance des culées en les éloignant de la plate-forme ou en les remontant suffisamment au sommet des talus.

Dans des contrées vallonnées, il pourra être judicieux de prévoir, si le terrain est de bonne qualité, un pont à béquilles qui, dégagant bien l'espace, est en général plus esthétique et peut être choisi pour marquer un point particulier d'un tracé (point haut, col) et rompre la monotonie d'une autoroute.

Par contre, pour un grand ouvrage, les contraintes techniques s'imposent et le pont devient nécessairement un élément dominant de l'environnement dont il faudra tirer le meilleur parti. C'est pourquoi, un tel ouvrage doit être traité avec beaucoup de sensibilité. Même lorsqu'il s'agit d'un pont sur lequel on veut attirer l'attention, il ne doit pas masquer le site dans lequel il est implanté, mais le mettre en valeur. Par exemple, lorsque nos anciens ont construit, il y a un siècle, le viaduc de Garabit dans une vallée peu marquante, ils ont réellement embelli et mis en valeur le site ; la tâche fut donc encore plus difficile lorsque nos ingénieurs ont eu à projeter un nouvel ouvrage dans cette vallée pour porter l'autoroute A75. Le parti retenu fut d'implanter l'ouvrage loin du précédent, à 1100 m, en veillant à ne porter aucune atteinte visuelle au site de Garabit et de projeter un élégant pont à béquilles enjambant de façon semblable avec majesté la vallée.

Dans un grand nombre de cas, c'est la recherche de la légèreté - ou de l'impression de légèreté - qui prédominera. Les développements récents en matière de conception des structures (précontrainte extérieure, extension du domaine d'emploi des ponts à haubans aux portées moyennes) et de qualité des matériaux (bétons de fibres, bétons à hautes performances) permettent, dans les cas complexes, d'alléger substantiellement le poids des tabliers.

On préférera souvent, pour des portées supérieures à 70 m, un tablier d'épaisseur variable dont l'aspect paraîtra plus agréable : les droites donnent toujours une impression de rigidité et leur forme technique et dépouillée contraste avec celles de la nature. Si l'épaisseur de l'ouvrage est constante, il faut veiller à la forme de la corniche et des piles pour ne pas donner une impression de rigidité - surtout si le site en vaut la peine.

La conception des piles elles-mêmes joue également un rôle capital dans l'aspect général de l'ouvrage. Pour des franchissements de vallées pro-

fondes, les appuis doivent paraître les plus "transparents" possibles pour ne pas donner l'impression d'obstruer la vallée ; le critère essentiel sera donc de chercher à réduire au maximum la somme des masses des piles.

Le projeteur devra souvent faire preuve d'imagination ; par exemple, pour le viaduc du Magnan, le système des doubles piles particulièrement apprécié pour la construction en encorbellement, permet d'atténuer quelque peu la lourdeur des poutres continues à hauteur variable surtout si les piles vont en se rétrécissant vers le haut ; le profil en I des piles contribue également à la beauté de l'ouvrage.

donnent une impression de puissance et de majesté. La technique des ponts à haubans permet de donner un très grand élancement au tablier du pont et confère à ce type d'ouvrage un charme esthétique indiscutable. On retiendra les exemples particulièrement élégants du pont de Seyssel, de la passerelle du port du Havre et du pont de Normandie, record mondial de portée.

3.3 La troisième règle qui paraît s'imposer est une bonne ordonnance de la structure.

L'ordre est expression de beauté et inversement le désordre crée un

lignes à courbure discontinue n'est jamais heureux car l'oeil est très sensible à de telles discontinuités. Il convient de traiter les profils en long des tabliers en raccordant les parties rectilignes par des arcs de parabole et de ne jamais passer brutalement d'un segment de droite à un arc de cercle.

Il convient d'éviter les profils en long concaves : ils donnent la fâcheuse impression que le tablier est en train de plier sous son poids propre ! Lorsqu'un tel profil en long ne peut être évité, le tablier doit être impérativement conçu de hauteur constante. Une autre situation délicate à traiter se présente lorsque l'on doit projeter



Toujours à Coudes, un ouvrage de style totalement différent

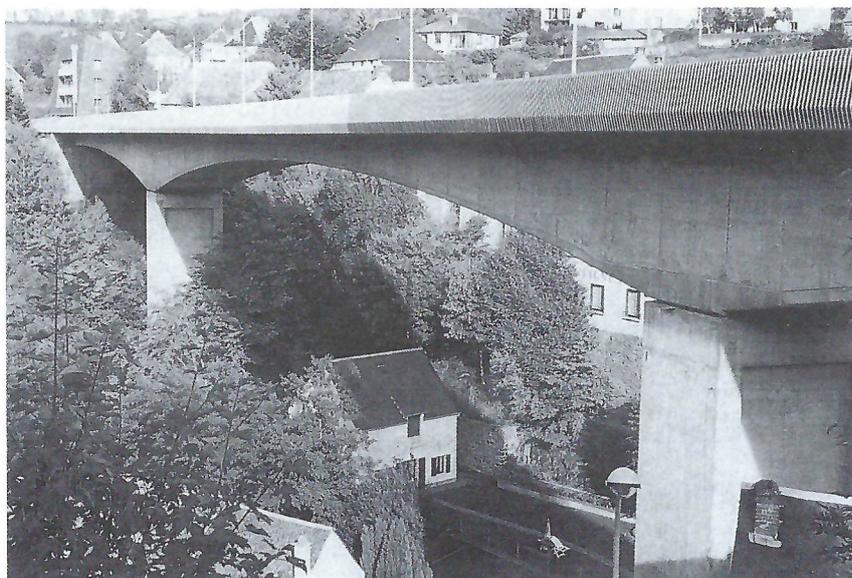
On remarquera aussi l'élégance du pont de Cheviré, ouvrage très large au gabarit contraignant, dont les études de conception assez complexes ont permis d'en alléger l'aspect : une solution avec deux tabliers parallèles a été écartée car ses appuis encombraient trop l'espace. La forme du caisson nervuré transversalement à âmes inclinées et la conception du chevêtre en tête des piles, ainsi que celle du socle à la base des appuis lui

malaise. Un observateur est troublé et se sent mal à l'aise lorsque les directions des membrures, supports, arêtes et autres sont trop diverses.

Il s'agit donc de limiter le nombre des directions dans l'espace ; dans le cas de certains ouvrages biais, par exemple, les lignes d'appui non parallèles sont à éviter. L'unité dans les lignes est également à rechercher ; c'est ainsi que l'aspect donné par des

un ouvrage très long avec des piles relativement courtes et situé dans un site sans relief. Il est préférable d'adopter un profil en long rectiligne pour s'accorder avec la caractéristique du site, mais il faut étudier avec beaucoup de soin le problème de l'évacuation des eaux de pluie (par exemple, en donnant à la chaussée un dévers approprié et en multipliant les gargouilles).

Il ne faut pas s'enfermer dans certaines règles issues de l'architecture classique : par exemple, un pont à nombre impair de travées n'est pas nécessairement plus esthétique qu'un pont à nombre pair de travées. Cependant, il convient de rechercher, selon le cas, la symétrie ou un rythme particulier. Par exemple, dans le cas d'une grande brèche franchissant plusieurs obstacles dont un majeur (un cours d'eau, par exemple), il s'avère souvent judicieux de franchir l'obstacle majeur par une grande travée (éventuellement de hauteur variable) encadrée par des travées plus courtes (de hauteur constante). La notion de rythme procure souvent de la satisfaction au regard, mais il faut absolument éviter toute exagération qui renverserait l'impression. [...]



Le Viaduc de Rochefort-Montagne (Puy-de-Dôme) a permis d'éviter la traversée du bourg par la RN 89.

Citons, pour terminer, quelques problèmes parmi les plus ingrats à traiter. Le premier concerne les "piles-culées", c'est-à-dire les appuis situés à la jonction de deux ouvrages qui peuvent différer par le mode de construction ou même par la structure. Ce cas se présente, par exemple, lorsque les deux ouvrages constituent deux lots confiés à des entreprises différentes et franchissent des brèches de nature différente. Leur juxtaposition sans précaution peut conduire à une esthétique très discutable.

Il convient de respecter les principes suivants :

- donner, dans toute la mesure du possible, la même hauteur aux deux tabliers, même s'ils sont confectionnés à partir de matériaux différents (béton et acier, par exemple) ;
- éviter impérativement de raccorder deux travées de hauteur variable (la pile-culée apparaîtrait comme une "béquille" destinée à soulager un ouvrage qui aurait du mal à se porter lui-même) ;
- si l'une des deux travées est de hauteur variable, prévoir une partie de hauteur constante suffisamment longue pour que la pile-culée apparaisse comme un appui courant ;
- éventuellement traiter la pile-culée comme un ouvrage fonctionnel pour marquer la séparation entre les deux ouvrages.

3.4 La quatrième règle concerne la mise en valeur de l'intention structurale.

Le fonctionnement statique apparent d'un ouvrage doit être intelligible, procurer une bonne impression de stabilité et tendre vers une grande simplicité. L'observateur a besoin de sentir intuitivement la fonction d'utilité de l'ouvrage et la forme qui en découle ; "la forme suit la fonction" pourrait-on dire pour cette règle. La forme de la structure porteuse, qui dépend du matériau, la descente de charges, les transferts d'efforts doivent paraître simples et clairs.

Par exemple, pour éviter l'aspect inesthétique de joints de reprise de bétonnage sur les colonnes très élancées d'une pile, l'ingénieur peut être tenté de masquer ces reprises par des faux joints, mais le profane aura l'impression que les colonnes sont réalisées avec des blocs de béton posés les uns sur les autres, alors qu'un empilement ne saurait assurer la stabilité. En masquant de cette manière la réalité, on commet une erreur sur le plan de l'aspect.

Dans un ouvrage, les parties composantes, éléments porteurs et éléments portés, doivent être nettement exprimées et la nature de leur liaison doit le plus souvent être affirmée ; par exemple, le mécanisme de la structure d'un pont à béquilles inclinées, avec articulation à la base, est bien apparent.

3.5 La cinquième règle concerne l'intégration de la structure dans son environnement, qu'il s'agisse d'un site de campagne ou d'un site urbain.

Le concepteur doit réfléchir à l'incidence qu'aura l'échelle de l'ouvrage sur le site, en imaginant notamment la manière dont l'ouvrage sera éclairé ; un petit ouvrage (quelques mètres) passera plus ou moins inaperçu, tandis qu'un ouvrage important s'imposera d'autant plus que ses dimensions seront plus imposantes, jusqu'à devenir un élément majeur du site (par exemple, les grands ponts suspendus). Cette règle a une certaine incidence

sur le choix de la structure, du matériau, de la couleur de l'ouvrage ou de ses équipements.

Les dimensions des constructions doivent aussi être à la mesure de l'homme : les formes lourdes et agressives angoissent l'observateur ; il faut donc impérativement les éviter. C'est pour cela que le projet doit être contrôlé de tous les points de vue que pourra prendre le futur observateur. Le dessin géométrique d'une élévation peut être très satisfaisant mais s'avère souvent insuffisant. Plusieurs perspectives en diagonale doivent être réalisées (de nos jours, les logiciels de conception assistée par ordinateur permettent facilement de les créer) car elles peuvent révéler des recouvrements inélegants. De plus il faut tenir compte de l'effet des ombres et de la lumière. Une dalle en large porte-à-faux plongera la poutre du pont dans l'ombre, celle-ci paraîtra plus légère, mais cette même ombre brisera tout l'effet de la courbure d'un arc. La construction de maquettes peut être utile pour l'appréciation des formes sous diverses perspectives dans le cas de grands ouvrages.

3.6 La dernière règle concerne l'aspect final des divers parements de l'ouvrage.

Un bel ouvrage est, avant tout, un ouvrage dont l'exécution est soignée. Certes, une recherche architecturale poussée peut être complètement neutralisée si, avant la mise en service d'un pont, on installe, par exemple, un grillage de grande hauteur pour prévenir la chute de colis depuis le tablier. Mais l'intégration dans l'environnement d'un pont dépend largement du choix des matériaux de construction et de la texture des surfaces. Par exemple, des surfaces rugueuses sont bien adaptées aux piles et aux culées alors qu'une texture lisse convient mieux aux corniches, aux poutres et aux colonnes élancées. De même, en règle générale, une surface mate est plus appréciée qu'une surface brillante.

En plus de la texture, la couleur du parement est un élément essentiel de l'effet esthétique global que présente-

ra l'ouvrage lorsqu'il sera réalisé ; les différents types de matériaux ou de composants permettront de jouer sur cet effet.

Au cours de la mise au point du projet, le concepteur devra également toujours penser à l'exécution et éviter des dispositions irréalistes ; dans le cas d'un ouvrage en béton, il ne devra pas prévoir des formes trop complexes ou délicates à coffrer ou à démouler sans être sûr que l'aspect final correspondra à son attente.

[...]

Le projeteur doit aussi penser aux détails dont l'oubli pourrait nuire à l'aspect final de l'ouvrage, notamment à tout ce qui concerne l'étanchéité et l'évacuation des eaux.

La beauté n'ayant besoin d'aucun ornement et se suffisant à elle-même, un ouvrage gagne à être sobre ; toutefois, l'ornement (parements ouvragés, corniches, garde-corps spéciaux, etc.) peut intervenir pour agrémenter et parfois souligner l'architecture, à condition d'être à l'échelle de l'ouvrage, mais il doit alors être prévu dès l'avant-projet.

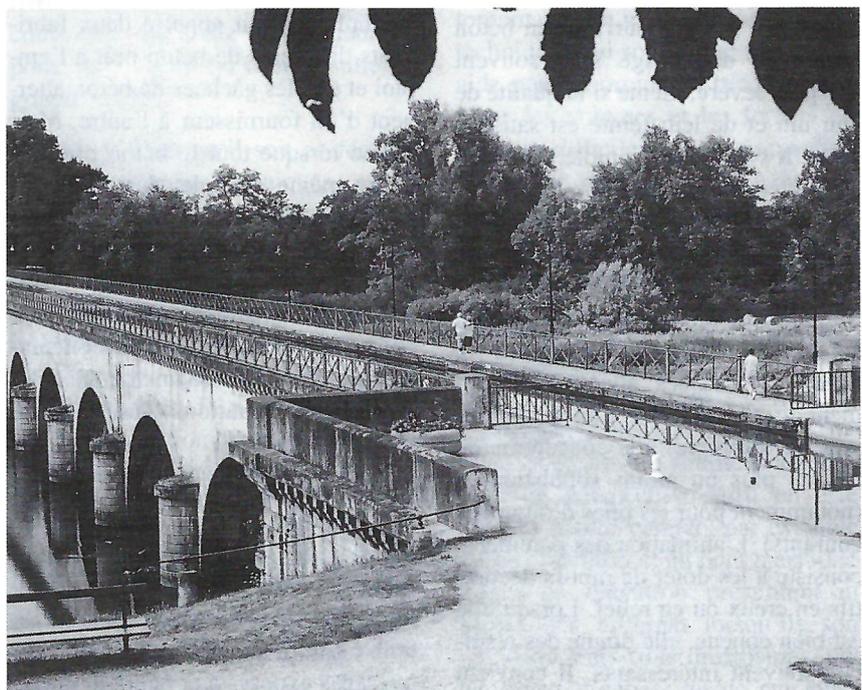
Il ne s'agit pas de croire que la simple application des quelques principes exposés ci-dessus assurera automatiquement la qualité esthétique du projet et, dans tous les cas, le concepteur devra faire preuve de fantaisie, d'in-

tuition, de créativité ainsi que de goût pour les formes et la beauté.

Néanmoins, ces règles constituent un point de départ, elles permettent un contrôle critique des ébauches, en rendant attentif aux erreurs de conception. Elles peuvent dans certains cas, être incompatibles entre elles et il est alors nécessaire de faire une optimisation en fonction du caractère du site et de l'ouvrage à construire. Il est d'autre part clair qu'il n'y a pas, pour un problème donné, une solution imposée par l'esthétique, il y a surtout des erreurs à éviter.

Certains pensent, parfois à juste titre, qu'une recherche architecturale poussée coûte cher. En fait, un pont agréable d'aspect n'est pas nécessairement plus cher qu'un pont d'aspect médiocre et, souvent, l'ingénieur pourra obtenir une amélioration sensible de la qualité esthétique pour un supplément de coût très faible, voire pour un coût identique ; parfois il pourra accepter un coût plus élevé si l'ouvrage entre dans la catégorie des ponts sur lesquels on veut attirer l'attention.

Le pont-canal au-dessus de la Loire à Digoin (Saône-et-Loire)



3.7 Aspects techniques particuliers des parements en béton.

3.7.1 La qualité des parements

Le fascicule n°65-A du CCTG (Exécution des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint par post-tension), transmis par décret n°92-72 du 16 janvier 1992, consacre un long chapitre aux parements et autres surfaces coffrées. Son article 55, relatif à l'assurance de la qualité pour les parements et les coffrages, spécifie la méthodologie à adopter et donne des conseils pratiques, sinon pour obtenir un résultat correct, du moins pour éviter un aspect désastreux.

Attirons seulement l'attention sur l'importance du respect des enrobages minimaux pour les armatures proches des surfaces coffrées. Beaucoup de parements vieillissent mal parce que les armatures, insuffisamment protégées, se corrodent et font éclater le béton de peau du fait de leur gonflement. Les règles BAEL et BPEL prescrivent un enrobage minimal de 3 cm pour toutes les surfaces soumises à des actions agressives, des intempéries ou des condensations, et un enrobage minimal de 5 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux brouillards salins.

3.7.2 L'animation des parements

Certaines grandes surfaces en béton brutes de décoffrage sont souvent d'aspect sévère, même si la qualité de leur uni et de leur teinte est satisfaisante. Il s'agit, par exemple, des murs de soutènement ou même des piles-voiles de ponts-dalles très larges. Pour atténuer cette sévérité et faire passer au second rang les inévitables irrégularités, on recourt volontiers - et ce, dès le stade de la conception - à diverses méthodes allant du traitement de surface (mise à nu des granulats, par exemple) à la conception de formes plus ou moins sophistiquées (notamment pour les piles d'ouvrages courants). L'animation des parements consiste à les doter de motifs décoratifs en creux ou en relief. Lorsqu'elle est bien conçue, elle donne des résultats souvent intéressants. Il convient

cependant de ne pas oublier que les détails de la décoration ne doivent pas être trop fins : ils doivent être à l'échelle de l'automobiliste se déplaçant à une certaine vitesse. En particulier, les rainures doivent avoir une largeur de l'ordre de 10 cm et une profondeur de l'ordre de 5 cm si leur fonction est de créer des jeux d'ombre et de lumière et si l'on veut que ces jeux subsistent même lorsque les parements seront ternis par la pollution atmosphérique. Bien évidemment, ces rainures entraînent une adaptation du ferrailage de peau qui n'est pas gratuite.

Rappelons qu'un rainurage vertical donne une impression d'élanement tandis qu'un rainurage horizontal accentue plutôt l'impression de massivité d'un élément.

Indiquons enfin qu'une étude architecturale de détail trop poussée est parfois superflue en milieu urbain, notamment au niveau des appuis. En effet, dans de nombreux cas, la lutte contre l'affichage sauvage a conduit les autorités locales à entourer d'un grillage des piles à la décoration très travaillée, ce qui ne correspond évidemment pas à l'intention initiale de l'architecte.

3.7.3 La couleur des parements

Les variations de teinte du béton sont particulièrement disgracieuses. Les risques sont accentués lorsque, par exemple, on fait appel à deux fabricants différents de béton prêt à l'emploi et que les gâchées de béton alternent d'un fournisseur à l'autre. Mais même lorsque tout le béton provient d'une même centrale, des variations de teinte sont possibles. Lorsque le résultat est catastrophique, il reste la possibilité de peindre l'ouvrage dans une couleur appropriée. C'est une opération qui est relativement onéreuse mais qui constitue une bonne solution dans les situations "désespérées".

En site urbain ou suburbain, une tendance récente se développe consistant à peindre les surfaces à l'aide de peintures spéciales anti-graffiti. Ces peintures sont très onéreuses, mais facilitent grandement l'entretien des ouvrages exposés aux dégradations.

4 - LA PREOCCUPATION ESTHETIQUE DANS LA DEMARCHE DU PROJETEUR

Qu'il s'agisse de petits ou grands ouvrages la démarche du concepteur peut être décomposée en trois phases.

En première phase, le projeteur doit recenser le maximum de données concernant l'ouvrage futur et son environnement. Les données naturelles énumérées au chapitre 2 sont à compléter en fonction des préoccupations esthétiques. Le projeteur s'intéressera à la nature du site dans lequel l'ouvrage sera implanté (urbain, rural, montagneux, en plaine...), et aux conditions dans lesquelles celui-ci sera vu. En effet, deux ouvrages semblables et de mêmes dimensions n'auront pas la même apparence suivant qu'ils seront construits au sein d'une ville industrielle ou en rase campagne. Il est donc indispensable que l'auteur du projet connaisse les composantes du site : route, rivière, canal, chemin de fer, végétation, couleur et style des constructions, luminosité, morphologie du relief, présence de falaises ou de remblais..., sans oublier de noter l'orientation de l'ouvrage qui déterminera la manière dont il sera éclairé. De plus, l'aspect de l'ouvrage doit être étudié à partir des points de vue réels les plus importants, qui peuvent être plus ou moins éloignés.

Dans le cas d'ouvrages hors agglomération, le point de vue à considérer est celui des automobilistes circulant au niveau inférieur ; quant aux ouvrages urbains, il y a lieu d'envisager des points de vue variés. Il est également indispensable de savoir comment l'observateur verra l'ouvrage : un automobiliste passant sous un ouvrage et roulant à 130 km h⁻¹ (cas par exemple, d'un passage supérieur sur une route en rase campagne) verra l'ouvrage d'assez loin et observera surtout la silhouette, les proportions, la forme générale et la couleur ; par contre, en milieu urbain, l'automobiliste roulant lentement, le piéton et le riverain auront l'occasion, quand ils côtoieront et verront la structure, de remarquer les détails constitutifs, les



Un viaduc pour le prochain axe autoroutier Clermont-Ferrand/Bordeaux, Bourg-Lastic (Puy-de-Dôme).

parements, les défauts qui résulteront d'un mauvais entretien, etc.

C'est dans un souci d'objectivité que l'analyse des données relatives au site s'appuiera sur des photographies prises des points de vue définis au préalable. A partir de l'ensemble des données concernant l'ouvrage futur et son environnement, il s'agit pour le projeteur de définir une forme générale qui soit en harmonie avec l'environnement : c'est ce que nous appellerons l'intention esthétique. Cette forme générale sera obtenue en jouant sur les portées et le nombre des travées, leurs proportions, la forme du tablier, celle des appuis, la présence éventuelle de culées apparentes...

Pour un ouvrage courant banal, l'ingénieur pourra en général concevoir seul un ouvrage d'aspect correct en respectant les règles de l'art. Par contre, l'architecte doit être associé à l'élaboration du projet dès la première phase des études lorsque les contraintes de l'ouvrage se compliquent ou lorsque l'ouvrage est classé non courant.

Les données fonctionnelles qui dépendent du tracé routier ne peuvent

en général pas être modifiées mais il est souhaitable de les adapter pour rendre l'ouvrage plus agréable d'aspect. Par exemple en terrain plat, la courbure verticale d'un passage supérieur par dessus une autoroute devrait se poursuivre jusqu'aux rampes d'accès de l'ouvrage. Il est aussi souhaitable, pour des ponts enjambant des rivières en plaine, de prolonger cette convexité sur toute la longueur du pont, quitte à ce qu'il en résulte de grands rayons.

De même, bien qu'il soit préférable, pour des raisons techniques, esthétiques et économiques de diminuer au maximum le biais des ouvrages, lorsque le projeteur aura malgré tout à prévoir un ouvrage biais, il devra disposer tous ses éléments constructifs transversaux (piles, culées, lignes d'appui, pièces de pont...) parallèlement à la direction principale de l'obstacle franchi ; on respecte ainsi le principe d'ordre indiqué en 3.3 en réduisant au maximum le nombre de directions dans les lignes de l'ouvrage.

En deuxième phase, le projeteur doit inventorier les différents types de structures techniquement envisa-

geables (en fonction des contraintes recensées en première phase), puis choisir celle qui répond le mieux à l'intention esthétique définie en liaison avec l'architecte.

Afin de mieux percevoir les solutions envisageables, le projeteur peut faire appel aux techniques d'approche visuelle telles que perspectives, photomontages ou même maquettes : ces techniques qui sont d'une très grande aide pour le projeteur, permettent de juger les volumes et les formes qui peuvent difficilement être appréhendés par le dessin courant à base de plans, élévations et coupes, car on voit presque toujours un ouvrage dans ses trois dimensions.

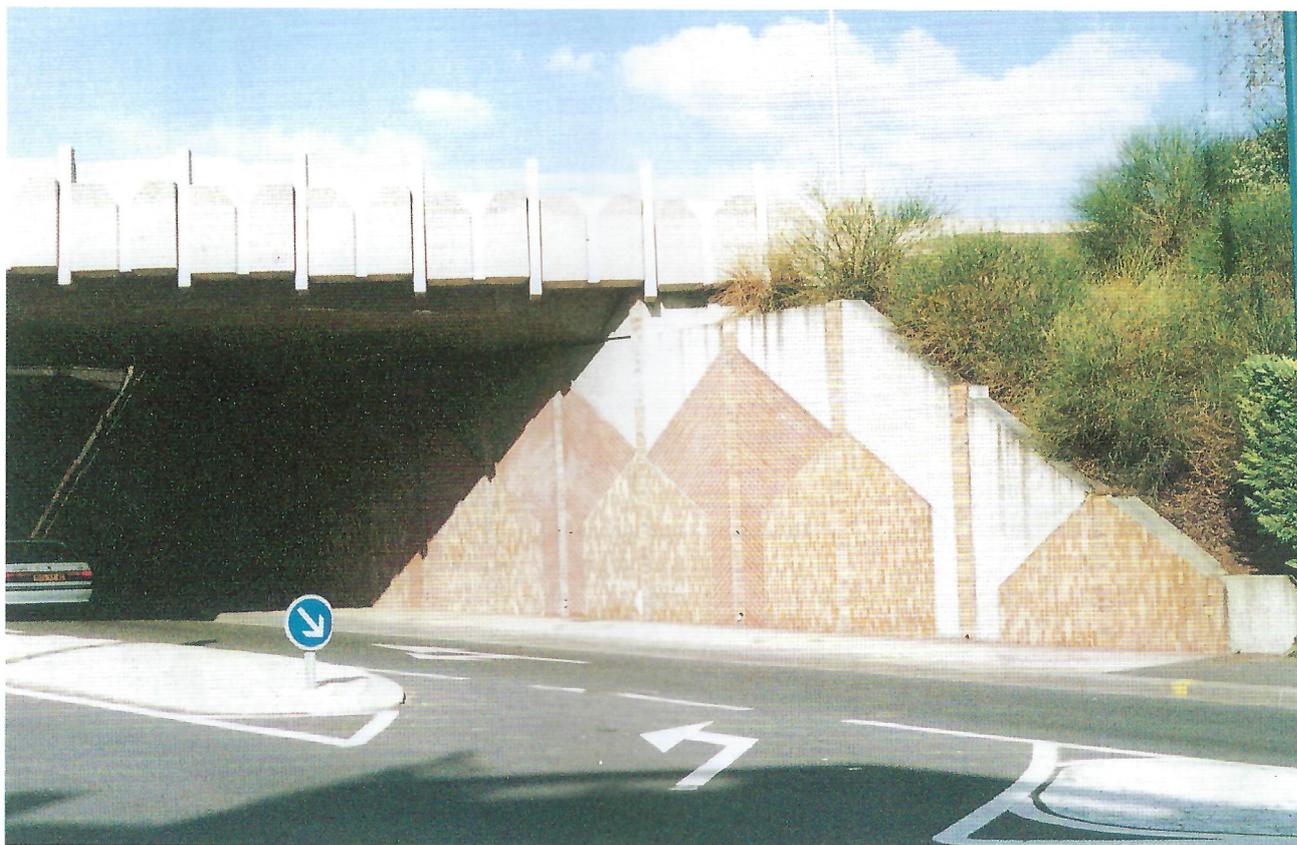
Les vues en perspective, élaborées à partir de points de vue d'où l'ouvrage pourra être regardé, permettent d'imaginer l'ouvrage tel qu'il apparaîtra en réalité ; le simple examen de vues en perspective suffit en effet pour se rendre compte, par exemple, qu'un pont droit et un pont biais identiques en élévation présentent un aspect très différent lorsqu'ils sont vus dans leurs trois dimensions, que les lignes d'appuis même peu nom-

breuses peuvent se transformer en une forêt enchevêtrée de poteaux ou qu'une pile en retrait au droit d'un gousset peut procurer un effet désagréable suivant le point de vue.

Toutefois, il est indispensable que ces vues perspectives ne soient pas effectuées de manière arbitraire ou fantaisiste : une perspective dessinée à main levée ou de manière un peu arrangeante, ou encore à partir de points de vue non réels, risquerait d'induire en erreur le projeteur.

Le concepteur peut aussi avoir recours aux techniques de photomontage, consistant à superposer une vue en perspective de l'ouvrage et une photographie du site, en veillant à ce que les points de vue soient les mêmes, faire construire une maquette, surtout pour des grands ouvrages pour lesquels élus et riverains apprécieront d'en avoir une vision plus représentative, ou encore utiliser les techniques les plus modernes de l'informatique permettant d'obtenir, par image de synthèse, des rendus réalistes faci-

tant le jugement de la qualité architecturale d'un ouvrage. Une fois le choix de l'ouvrage fait, la troisième phase de la démarche du projeteur consiste à étudier la forme et les détails des différents éléments de la structure et la mise en proportion et l'harmonisation de ces éléments les uns par rapport aux autres en s'inspirant des règles énoncées au paragraphe 3, en appliquant les principes techniques présentés dans les chapitres suivants et en laissant jouer son esprit créatif.



Parement décoratif pour un ouvrage urbain à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)

*“Un grand ingénieur n'est pas esclave de ses formules.
C'est un artiste qui utilise ses calculs comme des outils pour créer des formes
aussi évidentes et harmonieuses dans leur apparence que les lois naturelles
qui les sous-tendent. Il manie ses matériaux avec une vision poétique,
révélant ses forces ultimes à travers une structure appropriée à ses pouvoirs uniques”.*

E. Mock - The Architecture of Bridges, - N.Y. 1949