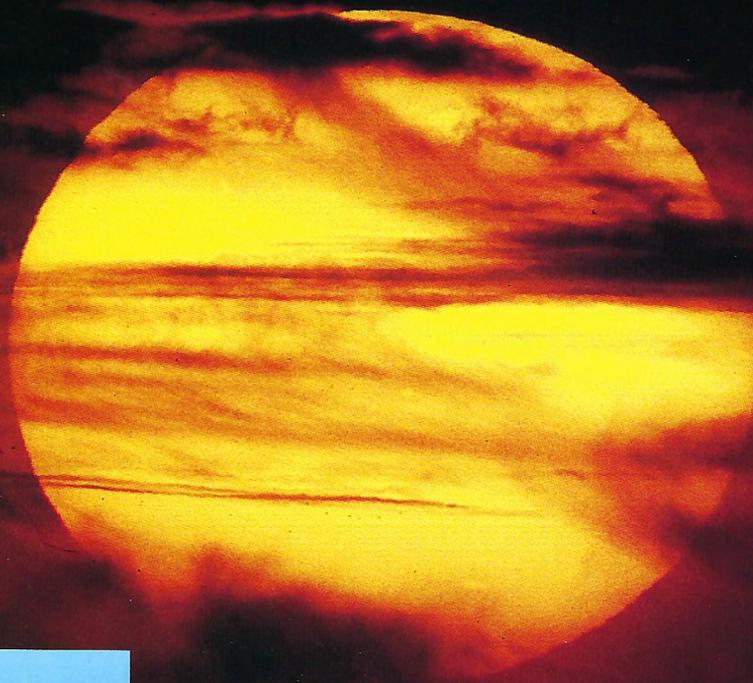


S AUVERGNE SCIENCES S

BULLETIN DE L'ADASTA

Mars 95

N° 33



*L'ordre et le
désordre
dans la matière*

*Optique
atmosphérique*

- L'ordre et le désordre dans la matièrep. 3
H. Ruhla

- Optique atmosphérique..p. 11
Michel Henry

Les Expositions

- Au musée d'histoire naturelle H. Lecoq à Clermont-Ferrandp. 22

- Au musée Crozatier du Puy-en-Velayp. 22

- Au musée Mandet à Riomp. 23

Informations régionales

- Une nouvelle école d'ingénieurs à Clermont-Ferrandp. 24

L'ADASTA reçoit le soutien financier :

- du Conseil Régional d'Auvergne
- du Conseil Général du Puy-de-Dôme
- du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

AUVERGNE-SCIENCES

Publication trimestrielle
19, rue de Bien-Assis
63100 CLERMONT-FERRAND
Directeur de la Publication
Pierre SOLE
Rédaction :
Roland JOUANISSON
N° ISSN 1166-5904

Photo de couverture :
Diverses propriétés optiques de l'atmosphère provoquent, essentiellement au lever et au coucher, la coloration et la déformation du disque solaire.
Photo prise au Pic du Midi par Stéphane Anglaret



Dépôt légal MARS 1995
N° Imprimeur 1916

Parmi les sujets de préoccupation de l'enseignement des sciences figure la persistance - voire le développement - des pseudo-sciences. Par exemple, l'astrologie qui avait pratiquement disparue au siècle dernier est maintenant présente dans tous les médias. Pendant ce temps le niveau scientifique baisse. Le nombre de jeunes sortant du système scolaire sans connaissances sérieuses est inquiétant. Comment s'étonner alors que le sens critique de nos concitoyens s'amenuise ?

Or, la science n'est pas l'apanage de quelques esprits distingués. C'est l'affaire de tous, et c'est ce que nous voulons montrer à travers les activités d'une association comme l'ADASTA.

Dans ce numéro d'Auvergne-Sciences nous avons fait appel, une fois de plus, à deux scientifiques réputés pour leur vaste culture et leur sens pédagogique. Le professeur Charles Ruhla, qui s'est beaucoup investi dans la formation des enseignants aborde ici, en s'appuyant sur l'exemple de la structure de la matière, la notion de modèle, à partir duquel s'élabore une théorie qui rend compte de l'ensemble des connaissances acquises dans un domaine de la science. Michel Henry, que nos lecteurs connaissent bien, décrit dans un langage accessible à tous, quelques phénomènes que chacun est en mesure d'observer dans l'atmosphère. Certains de ces phénomènes peuvent être simulés, parfois très simplement.

Ainsi nos lecteurs pourront alimenter leur réflexion sur la démarche scientifique à partir de textes de haut niveau : ceux-ci constituent une des bases de ce que doit être, selon nous, la diffusion de la culture scientifique et technique.

R.J.

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel	150 F
Adhésions à titre collectif	500 F
Membre bienfaiteur	1 000 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. 73 92 12 24 - Fax 73 92 11 04

L'ordre et le désordre dans la matière

Le Professeur Ch. RUHLA sera aux Cézeaux, au Département de physique de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, le 3 mai 1995, à 17 h 30 pour y présenter une conférence sur ce sujet.

MODELE, RECHERCHE, ENSEIGNEMENT :

La physique est la science de la matière inanimée et le physicien s'efforce donc de décrire, d'expliquer, cette matière inanimée dans les multiples aspects proposés par la nature. Pour chaque objet, pour chaque phénomène, il va donc proposer une loi, une théorie, dont le caractère mathématique permet d'aboutir à des prévisions quantitatives et opérationnelles. C'est le cas, par exemple, de la loi de compressibilité isotherme des gaz, proposée par Mariotte, ou de la théorie cinétique des gaz, proposée par Maxwell. Aucune loi, aucune théorie, ne peut prétendre représenter la réalité d'un phénomène dans son intégralité. Elle n'en contient souvent qu'une faible partie et c'est pourquoi l'on parle plus volontiers de modèle pour rendre compte des qualités et des limites d'une loi ou d'une théorie physique. Ainsi, le modèle est l'image que se fait le physicien de la nature à travers le fonctionnement de sa matière grise ; il apparaît à l'interface entre la nature et le physicien (figure 1).

La physique est donc l'ensemble des modèles proposés et validés expérimentalement par les physiciens. Elle se présente concrètement sous la forme des articles originaux publiés dans les grandes revues scientifiques internationales telles que : "Journal de Physique", "Physical Review", "Zeitschrift für Physik", "Nuovo Cimento",



Ch. RUHLA

Professeur à l'Université
Claude Bernard Lyon I

Dans le cadre d'une formation permanente des enseignants de sciences physiques il est important de prévoir, parmi les objectifs, une réflexion approfondie sur les concepts de la physique. C'est ainsi que la notion de modèle, qui est vraiment fondamentale, se doit de retenir notre attention, et nous le ferons à travers un exemple concret : la structure de la matière.

etc..., et l'on trouve des collections de ces revues dans les bibliothèques des laboratoires ; en bref, la physique, c'est tout d'abord une très grande quantité de papier imprimé. Il est intéressant, ensuite, de suivre le parcours de cette connaissance, depuis la découverte par les chercheurs, jusqu'à la prise en charge par les enseignants.

Après les articles originaux vient l'article de synthèse publié au bout de quelques années par un spécialiste du domaine. Souvent, et peu après, le même spécialiste transforme cet article de synthèse en un livre de synthèse et cet ouvrage devient alors une référence pour les chercheurs et les étudiants de 3^{ème} cycle. Plus tard, ces connaissances figureront dans des ouvrages de formation, pour les étudiants du 2^{ème} et du 1^{er} cycle universitaire. Enfin, elles apparaîtront dans les ouvrages d'initiation pour les élèves des lycées et collèges (figure 2).

Quelle est la durée de ce parcours ? Tout dépend de l'enjeu :

- S'il s'agit d'une découverte de physique expérimentale, ne remettant en cause aucun principe de base, ce parcours peut être très rapide : un professeur de terminale C, qui consulte bien régulièrement des revues de vulgarisation scientifique telles que "La Recherche" ou "Pour la Science", pourra parler à ses élèves des nouveaux supraconducteurs, un mois à peine après l'annonce de leur découverte dans la presse.

- S'il s'agit, en revanche, d'une découverte à la fois expérimentale et théorique telle que la radioactivité, qui correspond à une véritable révolution conceptuelle parce qu'elle introduit l'idée de la transmutation, alors, le cheminement est beaucoup plus long. Ainsi, jusqu'en 1950, des lycéens étudiaient la chimie, en France, sur des livres où l'atome était qualifié "d'indestructible", et ceci se passait,

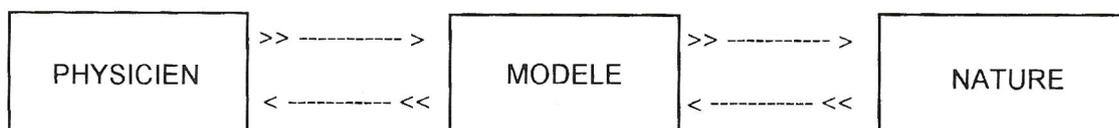


Figure 1 : Le rôle du modèle en physique

SCIENCE		PEDAGOGIE
Publication originale	* * * *	
	* * * *	
	* * * *	
Article de synthèse	* * * *	Chercheurs
	* * * *	
	* * * *	
Livre de synthèse	* * *	Etudiants 3 ^{ème} cycle
	* * *	
	* *	
Livre de formation	* *	Etudiants (maîtrise et DEUG)
	* *	
	*	
Livre d'initiation	*	Elèves (lycées et collèges)
	*	

Figure 2 : Le parcours du laboratoire à l'enseignement

cinquante ans après Becquerel et cinq ans après Hiroshima. Cette réticence à l'acceptation des concepts de la physique nucléaire ne doit pas nous surprendre parce qu'elle exige, à toutes les étapes, une révolution dans les esprits.

Le parcours qui va du laboratoire au lycée est donc difficile, semé d'embûches, parce qu'il faut simplifier sans déformer les modèles proposés par les physiciens. Ce travail pédagogique fondamental a été identifié comme tel par les didacticiens sous le nom de transposition didactique. L'objet du présent article est donc un exercice de transposition didactique sur le thème de la structure des corps purs.

ORDRE ET DESORDRE

Dès l'école primaire, on apprend qu'un corps pur peut exister sous trois états : solide, liquide, et gazeux. Cette vision macroscopique des propriétés de la matière est très fructueuse puisqu'elle est au cœur du développement de la thermodynamique classique, mais elle ne nous apprend rien sur les relations entre les propriétés macroscopiques et la structure microscopique de ces corps purs. Pour progresser dans cette direction, il nous faut faire appel à deux nouveaux concepts : l'ordre et le désordre. Sur cette voie, les physiciens ont tout d'abord identifié l'ordre parfait et le désordre parfait, puis, par un savant dosage d'ordre et de désordre, ils ont pu décrire les différents aspects de la

matière telle qu'elle apparaît dans la multiplicité des formes proposées par la nature. Nous allons donc les suivre dans cette démarche en proposant des modèles à la fois légitimes et suffisamment simples pour être utilisables devant des élèves de l'enseignement secondaire.

LE MONOCRISTAL

En examinant de la neige fraîche avec une forte loupe ou un microscope à faible grossissement on observe des cristaux de glace. La forme en étoile à six branches est à la fois très esthétique et très caractéristique. On trouve toujours un angle de 60° entre deux branches contiguës, qu'elles soient principales ou secondaires. Cette organisation de la matière est spontanée ; elle ne résulte d'aucune intervention humaine (fig. 3).

Depuis des siècles, les minéralogistes s'intéressent aux cristaux que l'on trouve dans la nature. Tous ont des

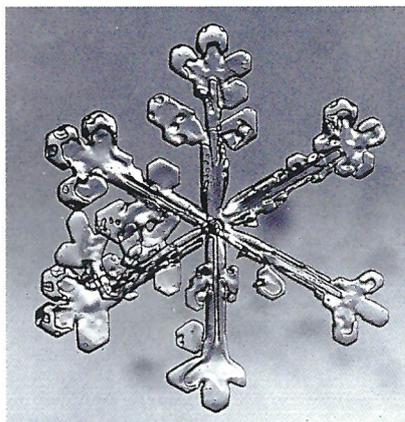


Figure 3 : Un cristal de glace

formes géométriques caractérisables par des angles : 60° pour le quartz, 90° pour le sel de mer, etc... Ces observations patientes ont débouché finalement sur une branche nouvelle de la physique : la cristallographie. Nous allons présenter ici une brève histoire de la cristallographie en nous limitant aux expériences cruciales : ce sont celles qui, à un moment donné, font basculer la communauté des physiciens vers un nouveau concept. Par cette voie, nous pourrions suivre les étapes de la construction du modèle de cristal parfait.

RENE-JUST HAUY ET LA MAILLE CRISTALLINE

La cristallographie commence en 1784 par une maladresse expérimentale. L'abbé HAUY, minéralogiste reconnu, est en visite chez un collectionneur qui lui présente un échantillon de calcite*. HAUY tourne et retourne le cristal dans ses mains tant et si bien qu'il finit par lui échapper et tomber sur le sol où il se brise en mille morceaux. Ce hasard malencontreux va profiter à celui qui est capable de le saisir car HAUY va remarquer que tous les morceaux ont une grande parenté de forme ; en particulier, les angles des faces au niveau des cassures sont toujours les mêmes. Rentré chez lui, HAUY s'arme d'un marteau et brise consciencieusement tous les beaux échantillons de sa collection personnelle ; il constate bien la même propriété et il s'écrit : "Tout est trouvé !". Il vient d'imaginer que si l'on cherchait à casser un cristal de calcite en morceaux de plus en plus petits, on finirait par aboutir à une unité limite, de forme rhomboédrique, qu'il baptise alors "molécule intégrante", et que nous appelons aujourd'hui maille élémentaire. C'est l'empilement de ces mailles élémentaires dans trois directions de l'espace qui permet d'expliquer les formes géométriques des cristaux de calcite que l'on observe à notre échelle. Il explique également ainsi l'existence des plans de clivage, parallèles aux faces de la maille élémentaire, et qui représentent des régions de moindre résistance le long desquelles se feront les cassures.

* Carbonate de calcium ; mode de réseau : rhomboédrique

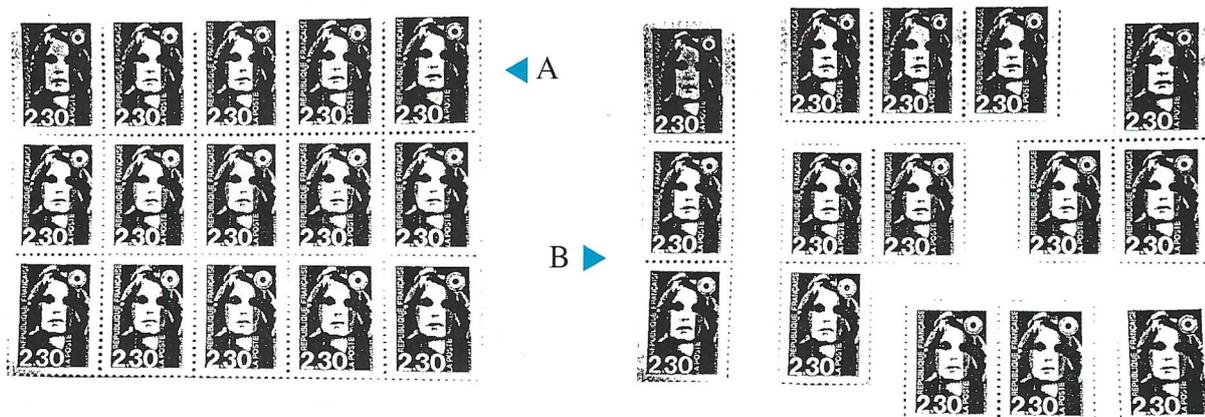


Figure 4 : Simulation à deux dimensions de l'expérience d'HAUY
 A) Un réseau plan et sa maille élémentaire
 B) L'opération de clivage

Pour la cristallographie, la mésaventure bénéfique de l'abbé HAUY joue le même rôle que l'histoire de la baignoire d'ARCHIMEDE pour l'hydrostatique, ou l'histoire de la pomme de Newton pour la gravitation. Racontée par HAUY lui-même, elle est peut être quelque peu apocryphe, mais son caractère pédagogique est indéniable, et l'on peut la répéter facilement devant un petit groupe d'élèves.

Un autre exemple pédagogique, limité à deux dimensions, est également facile à réaliser pour introduire les notions de maille élémentaire, d'ordre, et de direction de clivage. Si l'on examine une plaque de timbres, on constate que le timbre unique représente une maille élémentaire rectangulaire qui se répète périodiquement dans les deux directions principales définies par les côtés du rectangle. De ce fait, deux timbres consécutifs se déduisent l'un de l'autre par translation, c'est l'ordre à courte distance, et deux timbres éloignés se déduisent également l'un de l'autre par translation, c'est l'ordre à longue distance (fig. 4a).

On découpe ensuite la plaque de timbres en surfaces plus petites, en suivant les perforations car celles-ci représentent des régions de moindre résistance, et l'on obtient ainsi des figures plus petites, de formes variées, mais qui sont toutes limitées par des angles droits. De découpage en découpage on aboutit finalement à un rectangle irréductible (sans déchiru-

re) qui représente la maille élémentaire, c'est à dire le timbre unique (fig. 4b).

Pour en revenir à l'abbé HAUY, nous citerons en particulier son remarquable "Traité de cristallographie" édité en 1822. On y trouve par exemple la structure du sel de mer* qui résulte d'une maille élémentaire cubique dont les empilements créent, à notre échelle, la forme pyramidale bien connue sous le nom de trémie (fig. 5).

Ainsi, la première étape s'achève avec l'identification de la maille élémentaire, mais on ne parle pas encore d'atomes et l'expression molécule intégrante n'a rien à voir avec le concept de molécule qui sera utilisé plus tard par les chimistes.

LES QUATORZE RESEAUX DE BRAVAIS

La deuxième étape est purement mathématique et va caractériser une

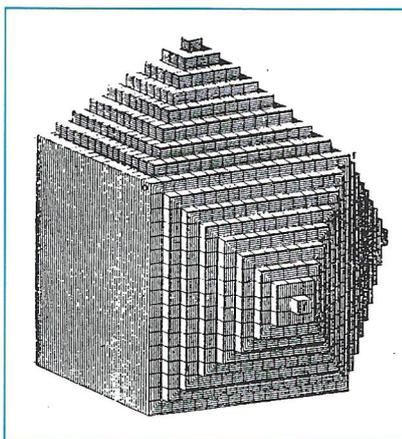


Figure 5 : La structure d'un cristal de sel de mer d'après HAUY

propriété fondamentale des figures à trois dimensions. Elle est découverte en 1848 par Auguste BRAVAIS et ses résultats sont publiés en 1850 dans le journal de l'école polytechnique sous le titre : "Les systèmes formés par des points". Le titre en lui-même est révélateur : il ne s'agit pas d'atomes mais simplement de points. La maille élémentaire proposée par HAUY se répète par empilement, de façon périodique, dans trois directions de l'espace, et l'on doit se demander quels sont les modèles de maille qui satisferont à cette propriété. La réponse donnée par BRAVAIS est claire : il y a 14 solutions exactes et 14 seulement (figure 6)**.

Cette découverte fixe un cadre précis aux travaux des cristallographes en

* Chlorure de sodium ; mode de réseau : cubique

** Les cristallographes distinguent :

- Les systèmes cristallins, au nombre de sept : cubique, quadratique, hexagonal, rhomboédrique, orthorhombique, monoclinique et triclinique.

- Les modes de réseaux correspondant à chaque système :

système cubique :	3 modes
système quadratique :	2 modes
système hexagonal :	1 mode
système rhomboédrique :	1 mode
système orthorhombique :	4 modes
système monoclinique :	2 modes
système triclinique :	1 mode

Au total il y a 14 modes de réseaux

Dans cet article nous nous limiterons à l'étude des trois modes du système cubique (cubique simple, cubique centré, cubique faces centrées).

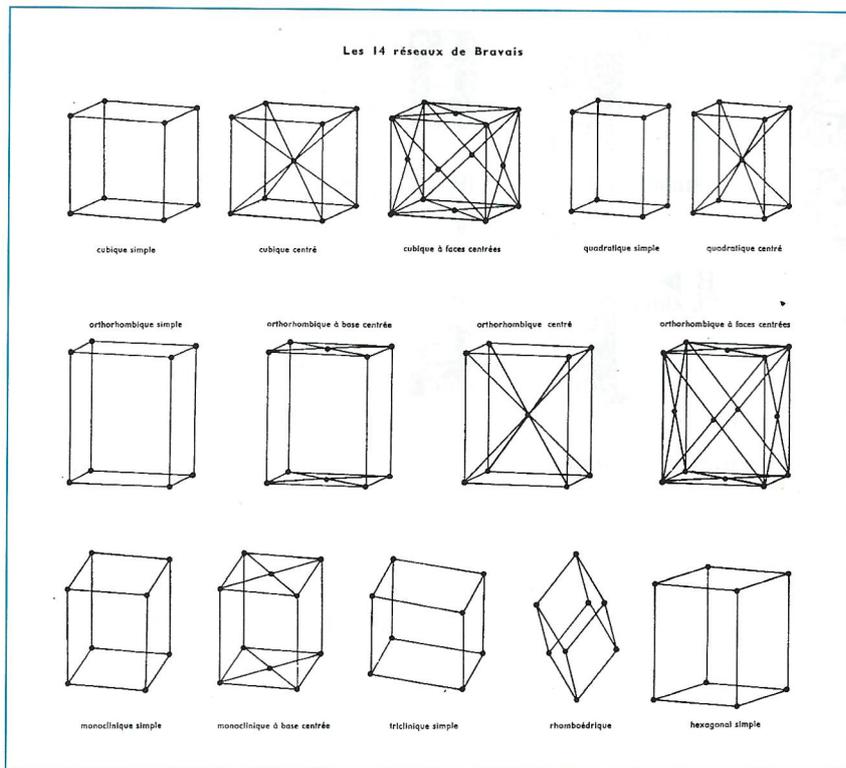


Figure 6 : Les quatorze réseaux de Bravais

leur indiquant les possibilités et les limites de leur recherche sur la structure des cristaux. En particulier elle fixe le type et le nombre de symétries qui sont caractéristiques de chacun de ces réseaux. En même temps, elle introduit la définition du monocristal, c'est à dire d'un cristal dont la structure est rigoureusement périodique, et qui, de ce fait, présente bien toutes les symétries qui sont attendues*. Par exemple, le réseau cubique présente les symétries suivantes :

- 1 centre de symétrie
- 3 plans de symétrie parallèles aux faces
- 6 plans de symétrie diagonaux
- 3 axes de symétrie quaternaire
- 4 axes de symétrie ternaire
- 6 axes de symétrie binaire

LES DIAGRAMMES DE LAUE

La troisième étape correspond à une communication présentée en 1912, devant l'académie des sciences de Bavière, par Max von LAUE sur le thème suivant : "Effets d'interférence des rayons de ROENTGEN". En effet, ROENTGEN a découvert en 1895 des rayons très pénétrants qu'il a baptisé rayons X ; mais on ignore encore leur nature. L'expérience de

LAUE a le grand mérite de montrer les propriétés ondulatoires des rayons X et de permettre d'accéder à la structure microscopique des cristaux. En voici le principe :

Un faisceau de rayon X, émis par une anticathode**, puis collimaté par des diaphragmes de plomb, arrive sur un monocristal de fluorine*** (fig. 7). Au delà de la cible, on observe que le faisceau initial s'est divisé en plusieurs faisceaux :

- Un faisceau axial, intense, qui est le prolongement du faisceau incident.
- Des faisceaux obliques, plus faibles, en nombre limité, et dont la répartition dans l'espace est caractéristique.

Une plaque photographique recueille l'ensemble des rayons émergents et les points d'impacts dessinent une

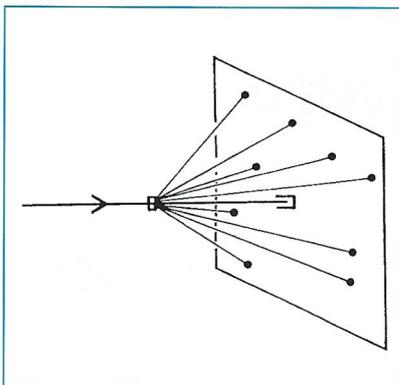


Figure 7 : Principe de l'expérience de LAUE

très belle figure géométrique : le diagramme de LAUE (fig. 8).

L'analyse du diagramme de LAUE conduit nécessairement à deux conclusions :

- L'existence d'une figure géométrique présentant des zones brillantes et des zones obscures évoque inévitablement le phénomène d'interférence et donc les propriétés ondulatoires des rayons X. En effet, si ce n'était pas le cas, on devrait plutôt s'attendre à une tache de diffusion qu'à une figure géométrique ordonnée.

- Les symétries observables sur le diagramme sont celles présentées à notre échelle par le cristal. Par exemple, la fluorine présente une symétrie ternaire ; elle était déjà bien connue du temps des minéralogistes, et elle est retrouvée de façon très évidente sur le diagramme. C'est la confirmation a posteriori des idées de HAUY et de BRAVAIS car les rayons X explorent la structure microscopique et montrent sa parenté avec la structure macroscopique.

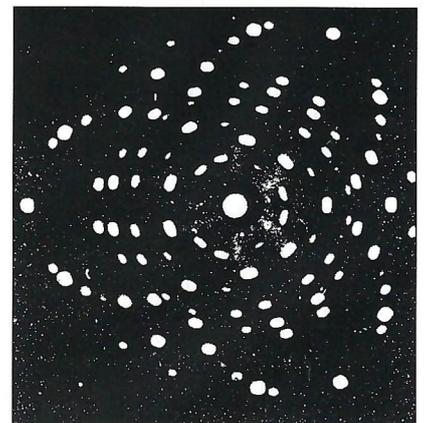


Figure 8 : Diagramme de LAUE de la fluorine

La notion de maille élémentaire est donc définitivement établie mais avec une précision supplémentaire. En effet, nous sommes en 1912, après les expériences de Jean PERRIN sur le

* Tous les modes de réseaux, sauf le triclinique, présentent des symétries variées par rapport à un point, un axe, ou un plan ; mais tous les réseaux, y compris le triclinique, sont symétriques par translation (périodicité de la maille).

** L'anticathode émet un spectre continu de rayons X

*** Fluorure de calcium ; mode de réseau : cubique faces centrées

mouvement brownien, la mesure du nombre d'Avogadro, et la communauté des physiciens admet enfin l'existence des atomes.

La maille élémentaire est donc un assemblage d'atomes et sa forme géométrique est due à la géométrie de cet assemblage. Tout est prêt pour l'étape suivante qui va suivre très vite.

LES MODELES CRISTALLINS DE WILLIAM BRAGG

Dès l'année suivante, William BRAGG propose une méthode d'analyse des diagrammes de LAUE et en déduit les structures des quatre halogénures alcalins les plus classiques : Cl Na, Cl K, Br Na, Br K. Ces résultats sont publiés dans les "Proceedings of the Royal Society" (1913).

L'analyse de BRAGG repose sur la notion de plan réticulaire. Si les atomes ont une disposition régulière périodique, on peut construire une infinité de familles de plans parallèles passant par les centres de ces atomes. les familles les plus importantes sont celles qui sont parallèles aux faces de la maille élémentaire et qui correspondent aux plans de clivage du cristal. Ces plans vont jouer le rôle de réflecteurs et si l'on envoie sur un monocristal un faisceau parallèle de rayons X, on aura, après réflexion, des directions de faisceaux réfléchis qui donnent lieu à des interférences constructives. Les angles correspondants sont donnés par une relation devenue célèbre sous le nom de relation de BRAGG :

$$2 d \sin \theta = k \lambda$$

d : distance entre deux plans réticulaires

θ : angle entre le rayon incident et le plan réticulaire

k : nombre entier

La connaissance de la distance d est une information capitale car elle permet de "placer" les atomes* et l'on aboutit ainsi à des modèles cristallins

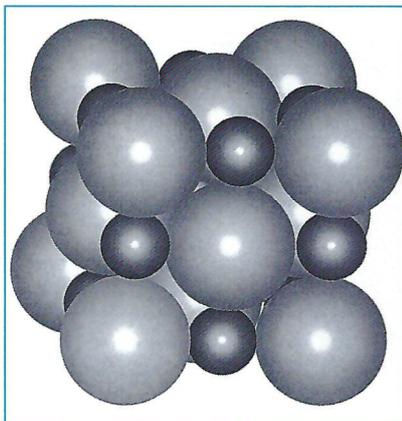


Figure 9 : La structure du cristal de chlorure de sodium d'après William BRAGG

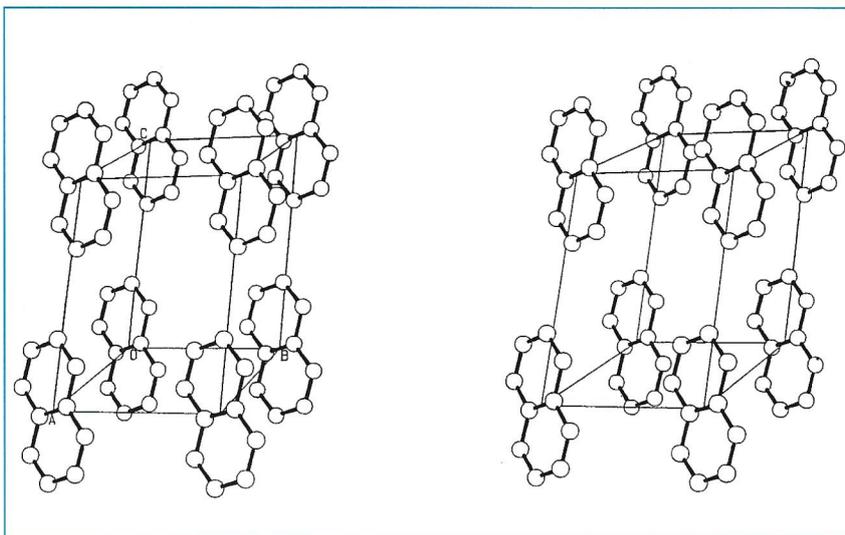


Figure 10 : La maille élémentaire du cristal de naphthalène, en vue stéréoscopique, telle qu'elle sort des spectres. (Laboratoire de cristallographie de Mme PERRIN, Université de Lyon)

très concrets tels que celui du chlorure de sodium (fig. 9).

Sur la base des idées de BRAGG, la méthode s'est largement perfectionnée :

- Utilisation des rayonnements variés (rayons X, neutrons, électrons).
- Automatisation de l'enregistrement des spectres.
- Informatisation du traitement des données.

Aujourd'hui on peut obtenir, en une semaine, la structure d'un cristal assez complexe tel que le naphthalène ; elle sort sur un listing sous la forme de deux vues stéréoscopiques. Il suffit alors de regarder ces images avec des lunettes appropriées pour voir immédiatement, et en relief, la maille élémentaire recherchée (figure 10).

LA MICROSCOPIE ELECTRONIQUE

Nous venons de voir comment, par un cheminement subtil, les physiciens étaient parvenus dès 1913 à une conviction fondamentale : la forme régulière du cristal à l'échelle macroscopique a pour origine la disposition régulière périodique des atomes à l'échelle microscopique. Mais le pédagogue peut souhaiter parvenir à ce concept par un chemin plus rapide et cela est possible aujourd'hui avec les images de microscopie électronique à très haute résolution.

Cette très haute résolution correspond à des tensions d'accélération supérieures au mégavolt**. Dans ce cas, la longueur d'onde associée aux électrons accélérés est inférieure à 0,1 Å***, c'est à dire nettement plus faible que les dimensions des atomes, et ceci minimise les phénomènes de diffraction. Si, d'autre part, on parvient à minimiser également les aberrations géométriques, on atteint

* La mesure absolue de d suppose une mesure absolue préalable de λ . Celle-ci est réalisée avec un réseau optique classique utilisé sous incidence rasante.

** La haute tension présente un avantage très appréciable car elle accélère les électrons à une vitesse suffisante pour qu'ils puissent traverser l'échantillon à observer sans être trop perturbés par les phénomènes de diffusion.

*** Rappelons qu'un angström vaut 10^{-10} m ou 0,1 nm

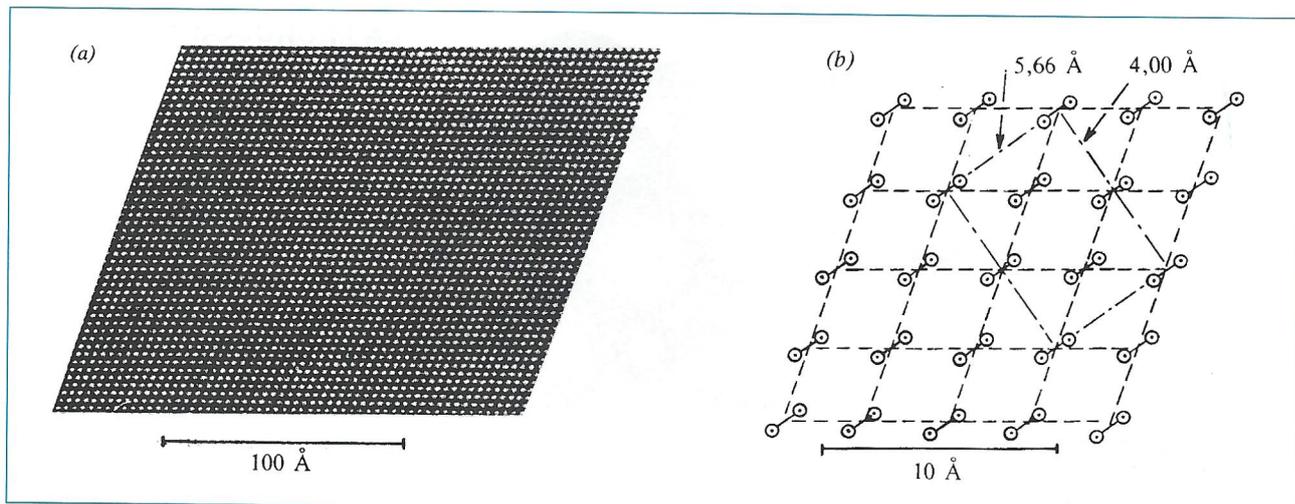


Figure 11 : La microscopie électronique à haute résolution
 a) Image d'un cristal de germanium
 b) Interprétation de l'image obtenue

effectivement la très haute résolution qui permet d'obtenir des images directes des atomes (fig. 11).

La figure 11a représente l'image d'un cristal de germanium avec une résolution de 2,5 Å. Chaque point correspond à un ensemble de deux atomes distants en projection de 1,41 Å. Ces points ont une disposition régulière caractérisée par un losange élémentaire dont les diagonales ont des longueurs de 4,00 et 5,66 Å (fig. 11b). Tout ces éléments correspondent à l'un des plans réticulaires de la structure diamant, qui est aussi celle du germanium (cubique faces centrées). De nombreuses images de ce type sont aujourd'hui disponibles et elles permettent aux élèves d'accéder facilement à la notion de disposition régulière périodique des atomes.

Pour en terminer sur ce point avec l'aspect pédagogique il nous reste maintenant à proposer un modèle atomique à trois dimensions pour représenter le monocristal. On imagine facilement de représenter les atomes par des boules et les liaisons par des tiges mais il nous faut, au préalable, valider ces représentations en réfléchissant aux notions de liaison chimique et de rayon atomique.

LA LIAISON CHIMIQUE

Pour décrire la force attractive qui assure la cohésion des édifices atomiques les théoriciens de la liaison chimique ont caractérisé quelques types fondamentaux que nous allons présenter succinctement :

- **la liaison ionique** : elle a pour origine l'attraction électrostatique entre les ions positifs et les ions négatifs. C'est le cas, par exemple, du chlorure de sodium. L'énergie des liaisons de ce type est de l'ordre de 5 eV/atome.

- **la liaison covalente** : elle a pour origine l'effet quantique d'indiscernabilité ; de ce fait, deux atomes voisins mettent en commun deux électrons, créant ainsi une paire qui assure la liaison. C'est le cas, par exemple, de la molécule d'hydrogène. L'énergie des liaisons de ce type est également de l'ordre de 5 eV/atome.

- **la liaison métallique** : elle a pour origine l'existence des électrons libres dans les métaux à l'état cristallin. Chaque atome s'ionise spontanément libérant dans le volume du cristal un (ou plusieurs) électrons, et c'est ce gaz d'électrons libres, de charge négative, qui assure la cohésion de l'ensemble des ions métalliques positifs. L'énergie des liaisons de ce type est de l'ordre de 1 eV/atome.

- **la liaison de Van der WAALS** : elle a pour origine une attraction électrostatique dipolaire instantanée entre les atomes (car la symétrie sphérique que l'on attribue à tous les atomes est un effet de moyenne temporelle). C'est le cas, par exemple, de tous les cristaux des gaz inertes (Ne, Ar, Kr, Xe). L'énergie des liaisons de ce type est de l'ordre de 0,1 eV/atome.

- **la liaison hydrogène** : c'est un cas particulier de la liaison ionique que l'on traite en général séparément en

raison de sa faible énergie de liaison (0,1 eV/atome). Elle joue un rôle très important en chimie organique en créant des ponts entre les molécules.

Pour un élément donné, l'atome correspondant ne donne pas lieu nécessairement à tous les types de liaison mais il en donne très souvent plus d'un. C'est ainsi que le sodium est en liaison métallique à l'état de corps pur cristallin et en liaison ionique dans le cristal de chlorure de sodium Cl Na ; le chlore est également en liaison ionique dans le chlorure de sodium mais il est en liaison covalente dans le tétrachlorure de carbone C Cl_4 ; seuls, les gaz rares sont limités à une seule liaison : la liaison de Van der WAALS.

Avec cette parenthèse, nous pouvons clore notre brève revue des différentes liaisons et nous focaliserons notre attention sur l'une d'entre elles, la liaison métallique, pour avancer vers notre objectif, qui est la représentation d'un modèle atomique de maille cristalline.

LE RAYON ATOMIQUE

Le fer à la température ordinaire est cristallisé dans le système cubique centré et porte le nom de fer α . La spectrométrie de rayons X permet de mesurer l'arête a_α de la maille qui est de 2,86 Å. La distance d entre les centres de deux plus proches voisins

correspond à la distance entre l'atome central et l'un quelconque des huit atomes disposés aux sommets. Un calcul élémentaire de géométrie donne alors :

$$d = 3^{1/2} a_{\alpha} / 2 = 2,48 \text{ \AA}$$

Il est ensuite assez naturel d'imaginer un modèle de maille élémentaire formé de sphères dures en contact et le rayon de ces sphères sera nécessairement :

$$r_{\alpha} = d_{\alpha} / 2 = 1,24 \text{ \AA}$$

Le modèle est alors facilement représentable avec des balles de ping-pong (fig. 12).

Mais il reste encore à se poser une question fondamentale : ou bien ce modèle est strictement limité à la représentation du fer α , et dans ce cas son intérêt est très réduit, ou bien ce modèle définit un rayon atomique utilisable pour toutes les variétés cristallines du fer, et dans ce cas son intérêt est grand car il devient opérationnel. Nous allons le vérifier en étudiant la transition de phase du fer α en fer γ qui se produit à 910°C (fig. 12).

Analysons les différentes étapes :

1) A l'état initial, à 25°C , l'arête de la maille élémentaire est $a_{\alpha} = 2,86 \text{ \AA}$, et le rayon atomique est $R_{\alpha} = 1,24 \text{ \AA}$.

2) En passant de 25°C à 910°C le fer se dilate et l'arête de la maille élémentaire atteint la valeur $a_{\alpha} = 2,95 \text{ \AA}$. On en déduit que le rayon atomique est maintenant $r_{\alpha} = 1,28 \text{ \AA}$. Cela revient à dire que les atomes "gonflent" quand on chauffe et cette idée ne doit pas nous choquer car elle résulte naturellement de la définition que nous venons de donner du rayon atomique (demi-distance entre deux plus proches voisins).

3) La transition de phase de fer α en fer γ correspond à un réarrangement des atomes qui vont passer d'une maille cubique centrée à une maille cubique faces centrées. Nous admettrons par hypothèse que le rayon atomique ne change pas ce qui s'écrit :

$$r_{\alpha} = r_{\gamma} = 1,28 \text{ \AA}$$

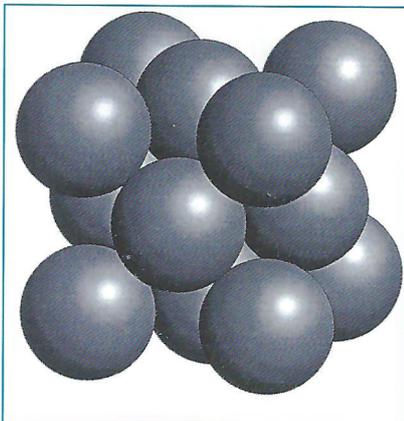
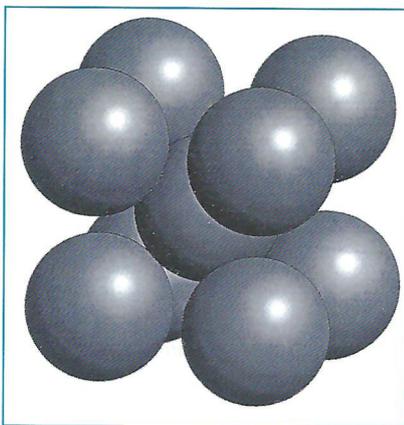


Figure 12 : La transition de phase du fer α en fer γ à 910°C .

- En haut, la maille élémentaire du fer α (cubique centré)

- En bas, la maille élémentaire du fer γ (cubique faces centrées)

La transition se fait par réarrangement sans modification du rayon atomique

La connaissance de r_{γ} nous permet le calcul de l'arête de la nouvelle maille : $a_{\gamma} = (2)^{3/2} r_{\gamma} = 3,62 \text{ \AA}$

Notre modèle élémentaire nous fait donc prévoir à 910°C une maille élémentaire d'arête $a_{\gamma} = 3,62 \text{ \AA}$. A cette même température, la mesure par spectrométrie de rayons X donne comme valeur $a_{\gamma} = 3,685 \text{ \AA}$

L'écart relatif entre les deux valeurs est de 1,8 % ce qui est tout à fait remarquable avec un modèle aussi élémentaire. Ce type d'analyse est donc une validation ; cette validation est généralisable, et elle nous permet d'affirmer que pour chaque métal on peut définir un rayon atomique. Cette définition est pertinente car elle est opérationnelle. On peut exprimer encore mieux cette idée en disant simplement que le modèle atomique de sphères dures en contact est un bon modèle.

Signalons enfin pour conclure qu'il est possible, par des méthodes analogues, de définir un rayon ionique, un rayon de covalence et un rayon de Van der WAALS. Pour le même atome ces rayons sont tous différents*.

L'ORIGINE DES SYMETRIES

Nous venons de valider la notion de rayon atomique R^{**} dans une situation correspondant à deux sphères dures en contact, et ce succès nous donne une information sur la force qui s'exerce entre deux atomes : nulle à l'infini, cette force est attractive si la distance entre les centres des deux atomes est supérieure à $2R$, et fortement répulsive si cette distance est inférieure à $2R$. On peut donc se donner une représentation simple de l'énergie potentielle d'un ensemble de deux atomes (fig. 13a).

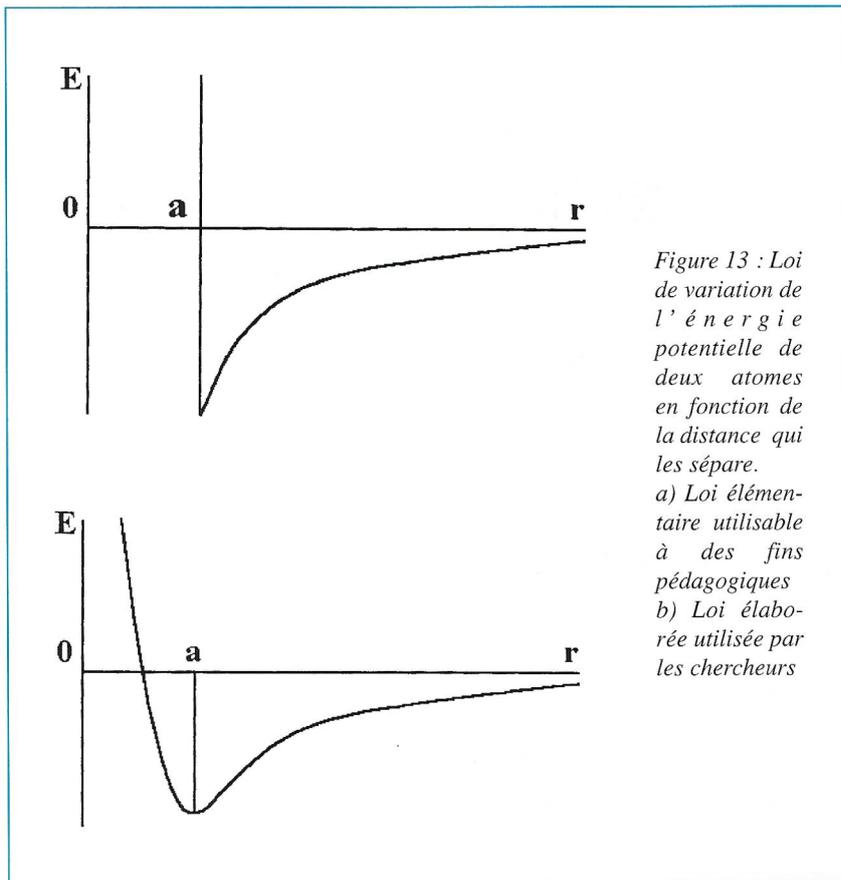
Les chercheurs utilisent aujourd'hui une représentation plus élaborée (fig. 13b) mais en fait très proche de la précédente. Le modèle de sphères dures, que nous allons utiliser à des fins pédagogiques, est donc une simplification légitime du modèle des chercheurs.

La connaissance de cette loi de force permet de comprendre comment s'édifient les structures cristallines. En effet, les atomes vont tendre à se rapprocher les uns des autres jusqu'à ce qu'ils arrivent en contact, occupant ainsi le plus d'espace possible et laissant le moins de vide possible. On peut résumer cela en disant qu'il existe un principe de compacité maximale***.

* Les atomes des gaz rares, qui n'ont qu'un seul type de liaison, n'ont qu'un seul rayon : le rayon de Van der WAALS. Pour les autres éléments, plusieurs types de liaison, et donc de rayon, sont possibles.

** Nous désignons le rayon par R pour bien montrer qu'il ne s'agit plus d'une distance variable r mais d'une caractéristique atomique R .

*** Les esprits facétieux ne manqueront pas de remarquer que cela revient à dire que la nature a horreur du vide, mais l'analyse que nous venons d'en donner à partir de la loi de force est un peu plus convaincante dans la mesure où la notion de force est bien reconnue par les physiciens.



La géométrie permet le calcul du taux d'occupation de l'espace, dans le modèle de sphères dures en contact, pour les différents types de maille cristalline. On trouve ainsi :

- Cubique simple : 0,52
- Cubique centré : 0,68
- Cubique faces centrées : 0,74
- Hexagonal compact : 0,74

Regardons maintenant ce qu'il en est pour 32 métaux usuels :

- Cubique simple : 0
- Cubique centré : 14
(Ba, Cs, Cr, Fe, Li, Mo, Ni, K, Rb, Na, Ta, W, V, Zr)
- Cubique faces centrées : 12
(Al, Ca, Ce, Cu, Au, La, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Sr)
- Hexagonal compact : 6
(Cd, Co, Gd, Mg, Ti, Zn)

On remarquera que les mailles correspondant à un taux élevé d'occupation de l'espace sont les plus favorisées et ceci correspond bien aux prévisions du modèle, mais son plus grand succès est l'explication des symétries observées et nous pouvons l'illustrer en construisant des modèles concrets par empilement d'oranges. Par exemple, la disposition régulière

de ces oranges à partir d'une base triangulaire, permet à volonté de retrouver les géométries du système cubique faces centrées (fig. 14a) ou du système hexagonal compact (fig. 14b). C'est donc bien l'empilement régulier des atomes qui est à l'origine des symétries des cristaux.

Nous pouvons clore ici la description du monocristal. Sa structure est parfaite par sa régularité, par ses symétries, aussi bien à l'échelle macroscopique qu'à l'échelle microscopique. Le monocristal représente l'ordre parfait.

Nous allons passer maintenant à l'autre extrême en décrivant le désordre parfait et nous allons, là aussi, présenter les étapes fondamentales de la construction de ce concept.

Ce sera l'objet d'un autre article qui paraîtra dans le prochain numéro d'Auvergne Sciences.

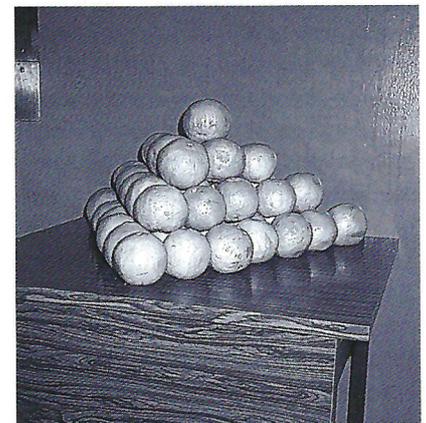
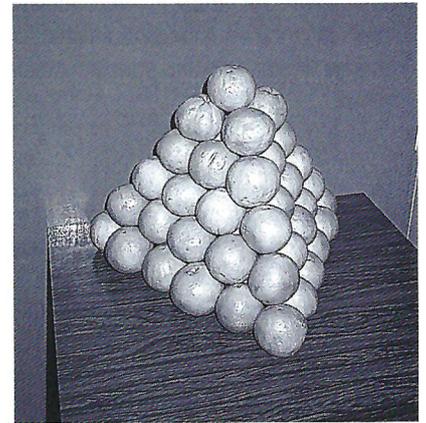


Figure 14 : Modélisation de la structure cristalline par un tas d'oranges.

- En haut, système cubique faces centrées
- En bas, système hexagonal compact



MATERIEL ELECTRONIQUE PROFESSIONNEL

Composants - Mesure - Outillage
Réalisation circuits imprimés

63000 CLERMONT-FERRAND
22, rue Saint-Adjutor
Réel. 73 31 13 76 - Fax 73 31 09 34

87000 LIMOGES
17, rue des Arènes
Tél. 55 32 47 96 - Fax 55 32 42 83

Optique atmosphérique

I - INTRODUCTION

Dans l'acception usuelle du terme, les sciences de la nature sont le domaine du biologiste pour les êtres vivants, et du géologue ou de l'ingénieur, pour le monde inanimé, domaine dont le physicien leur concède volontiers l'exclusivité, sous le fallacieux prétexte qu'il est difficile, voire impossible, de les traduire par des équations. C'est du moins l'échappatoire que j'ai invoquée pendant de nombreuses années.

Pourtant la quasi-totalité de ces phénomènes naturels est régie par les lois de la physique et nous ne pouvons manquer d'y trouver une multitude d'exemples et une source inépuisable de problèmes.

En particulier, les phénomènes lumineux dont l'atmosphère est le siège et qui sont, pour certains, quotidiens, illustrent de façon remarquable les lois de l'optique, des plus simples aux plus complexes et des plus anciennement connues aux plus récemment découvertes. Mon but aujourd'hui est de vous le montrer sur quelques exemples et si possible de vous inciter à en chercher d'autres.

Par la force des choses je devrai me limiter à des indications ponctuelles. Sachez cependant qu'elles ne représentent que la partie émergée de l'iceberg. Pour la même raison, je me restreindrai à ce qu'il est convenu d'appeler "optique atmosphérique" ou encore "optique météorologique", c'est-à-dire pour l'essentiel l'interaction de la lumière du Soleil et de l'atmosphère, excluant entre autres les phénomènes lumineux comme les éclairs ou les aurores boréales.

Pour faire simple, je choisirai toujours comme source de lumière le Soleil, mais il doit être bien entendu que d'autres sources comme la Lune ou les lampadaires donnent naissance à des phénomènes similaires, compte tenu de leur différence de luminosité ou de taille.

Encore un mot : plutôt qu'à un cours de physique, je vous convie à une



Michel HENRY
Université Pierre et Marie Curie
Paris

promenade en plein air pour admirer quelques uns des merveilleux spectacles que nous offre la Nature.

Assez schématiquement, les lois de l'optique peuvent être rattachées à deux grands modèles de comportement de la lumière : le rayon lumineux et l'onde lumineuse. Je suivrai cette distinction qui est aussi celle de la quasi-totalité des traités d'optique.

II - LE RAYON LUMINEUX

Voyons d'abord les phénomènes que nous pouvons rattacher à la notion de rayon lumineux, ou à l'optique géométrique si vous préférez et rappelons en la caractéristique essentielle.

En deux mots, nous admettons qu'une source de lumière, le Soleil dans le cas présent, émet quelque chose qui se propage le long de courbes géométriques, les rayons lumineux. Dans la plupart des cas ces courbes sont des droites, mais nous verrons qu'il existe des exceptions.

II-1 RAIS DE LUMIERE

Le Soleil filtrant à travers les nuages ou à travers un feuillage pas trop dense nous permet souvent d'observer de tels rayons, et il est probable qu'un tel spectacle est à l'origine du concept de propagation rectiligne.

Il s'agit là d'un spectacle tout à fait banal, mais qui sera à l'origine de nos premières interrogations.

Compte tenu de l'éloignement du Soleil, ces rayons devraient être paral-

lèles. Pourquoi paraissent-ils converger vers lui ?

Pourquoi les observons-nous surtout en fin d'après-midi, et, au fait, pourquoi les voyons-nous tout court ?

Nous pouvons répondre tout de suite à la première question : il s'agit d'une illusion d'optique, celle-là même qui nous fait paraître converger les rails d'une voie ferrée, ou les rangées d'arbres d'une plantation.

Répondre à la deuxième question est aisé dès que nous avons la solution de la troisième. Nous voyons les rais de lumière parce que les gouttelettes d'eau et les poussières en suspension dans l'air diffusent la lumière, c'est-à-dire la réémettent dans toutes les directions, et en particulier vers notre œil. L'activité du Soleil, jointe à celle des hommes, fait que la concentration de particules diffusantes est plus élevée en fin de journée, aussi est-ce à ce moment qu'il est le plus courant de voir les rais de lumière. Bien entendu, il est possible de les observer à d'autres heures de la journée, quand l'état de l'atmosphère s'y prête, par exemple dans les petits matins brumeux d'automne ou d'hiver.

Vous pouvez simuler ces rais de lumière en faisant passer le faisceau lumineux émis par une lanterne de laboratoire ou un projecteur de diapositives dans un aquarium plein de fumée ou d'eau troublée par très peu de lait ou de savon, sans oublier la classique fluoresceïne.

Dans le ciel les rayons paraissent isolés parce que des nuages interceptent une partie de la lumière du Soleil même s'ils ne sont pas visibles car situés sous l'horizon. Quant à la diffusion elle-même, c'est un phénomène important sur lequel nous reviendrons plus en détail par la suite.

II-2 SPECTRE DU BROCKEN - TACHES DE LUMIERE

La propagation rectiligne de la lumière permet d'interpréter simplement la formation des ombres comme vous le savez tous. Toujours par le biais de la

diffusion, un nuage ou une nappe de brouillard peut servir d'écran et révéler l'ombre d'un obstacle situé entre le Soleil et lui. Historiquement l'obstacle était le corps d'un alpiniste et l'ombre prise pour un fantôme, d'où le nom de "spectre du Brocken". Le Brocken est un sommet de la région du Harz en Allemagne, réputé comme rendez-vous de sorciers et c'est là où la tradition situe la célèbre nuit de Walpurgis. Au niveau du sol, il est assez rare de voir le spectre du Brocken, mais les aéroliers et les aviateurs le connaissent bien.

Le montage utilisé dans l'expérience précédente permet aussi de figurer le spectre du Brocken. Il suffit d'intercaler dans le faisceau de lumière une silhouette découpée dans du bristol, ou encore un petit personnage.

Même quand le temps est clair, les jeux d'ombre et de lumière révèlent de bien curieux phénomènes. Vous avez tous passé un moment à l'ombre d'un arbre par une belle journée de printemps ou d'été. Avez-vous remarqué la forme des taches de Soleil formées sur le sol ? La plupart sont arrondies, elliptiques pour être précis. En fait, ce sont de véritables images du Soleil.

Pour en comprendre l'origine, imaginez un interstice entre les feuilles, de forme a priori quelconque, et un écran perpendiculaire aux rayons du Soleil. Un point de celui-ci donne sur l'écran une tache de lumière de même forme et de mêmes dimensions que l'ouverture. Un autre point du Soleil donne une autre tache, identique à la précédente, mais légèrement décalée. La superposition de toutes ces taches donne leur forme particulière au profit de celle du Soleil (figure 1). Ce nivellement est d'autant mieux réalisé que l'écart entre les taches "élémentaires" est plus important, donc que l'arbre est plus élevé et son feuillage plus dense. En fait, quelques mètres suffisent amplement dans la majorité des cas.

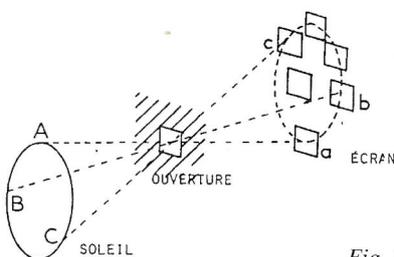


Fig. 1

Il faut bien noter que la source de lumière doit avoir un diamètre apparent sensible, faute de quoi la tache de lumière garde la forme de l'ouverture, ainsi qu'il est facile de s'en assurer.

A défaut d'arbre, vous pouvez interposer dans le faisceau lumineux un morceau de bristol dans lequel vous avez découpé des ouvertures de petite taille, de l'ordre du centimètre, et de formes diverses. Une variation curieuse consiste à interposer cet écran dans le faisceau d'un projecteur de diapositives. Il se forme alors autant d'images du filament de l'ampoule, qui constitue la source de lumière effective.

II-3 HALOS ET PARHELIES

Après la propagation rectiligne de la lumière et la formation des ombres, abordons la réflexion et la réfraction. Nous devons disposer de miroirs et de prismes d'une taille suffisante, au moins égale à une fraction de millimètre, pour pouvoir encore utiliser le modèle du rayon lumineux.

Il est remarquable que de tels miroirs et prismes existent dans l'atmosphère : les cristaux de glace. Je ne parle pas ici de flocons de neige dont les formes sont en général trop complexes mais des petits cristaux constituant les nuages glacés et tombant

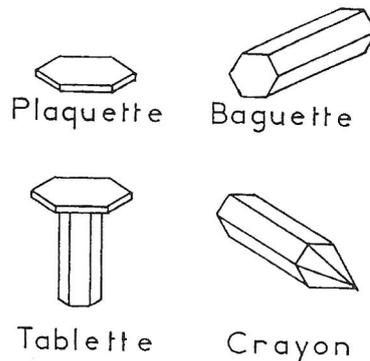


Fig. 2

lentement sous l'effet combiné de leur poids et de la résistance de l'air. La glace cristallise dans le système hexagonal, aussi ces cristaux dérivent ils du prisme droit à base hexagonale terminé par une face plane ou une pyramide. Leur étude in situ montre que

1 - Les paragraphes en italique décrivent des expériences - aussi simples que possible - de simulation des phénomènes décrits dans le corps de l'article.



L'arc en ciel est le plus célèbre des phénomènes atmosphériques.

(Photo : G. Degenne)



Les couronnes solaires sont dues à la diffraction de la lumière par des gouttelettes d'eau. (Simulation en laboratoire).

la quasi totalité d'entre eux peut être répartie en deux grandes catégories : les plaquettes de hauteur petite devant les dimensions latérales et les baguettes pour lesquelles la situation est inversée (figure 2).

De tels cristaux peuvent réfléchir la lumière sur l'une quelconque de leurs faces. Ils peuvent aussi la réfracter et se comportent alors soit comme des prismes d'angle au sommet 60° , soit comme des prismes d'angle au sommet 90° , l'indice de réfraction de la glace, voisin de 1,3, autorisant cette dernière réfraction.

Voyons d'abord les effets de la réflexion. Chaque cristal joue le rôle d'un petit miroir plan et donne une image du Soleil. S'il existe des orientations privilégiées, nous pouvons nous attendre à une répartition particulière de lumière.

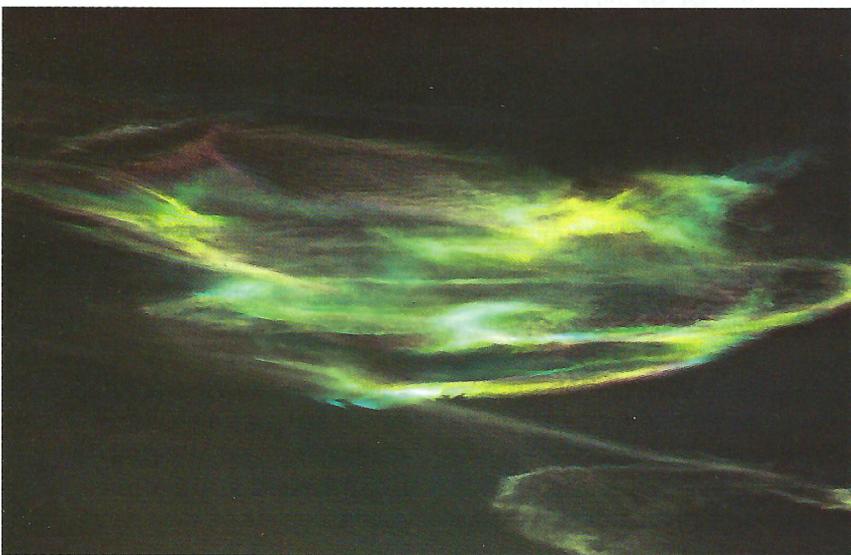
Ainsi, imaginons que ces miroirs soient tous orientés parallèlement à un même plan. Toutes les images du Soleil sont confondues et l'ensemble



Il est très rare de pouvoir observer comme ici le "rayon vert" au lever ou au coucher du soleil. (Photo prise au Pic du Midi par Stéphane Anglaret)



Parhélie due à la réfraction de la lumière par des cristaux de glace.



L'observation du ciel réserve parfois des surprises. Ici l'explosion d'une fusée dans la haute atmosphère a laissé des traces colorées longtemps après le coucher du soleil. (Photo : R. Jouanisson)

des cristaux se comporte comme un unique miroir plan. L'observateur voit alors deux Soleils : le vrai et son image par réflexion, appelée "faux Soleil" ou encore "sous Soleil". Là encore, les "volants" sont plus familiers de ce spectacle que les "rampants".

Divers prélèvements effectués en avion, ou au niveau du sol dans les régions polaires, ont mis en évidence dans certains cas une orientation privilégiée des cristaux de glace : les faces terminales des plaquettes et les faces latérales des baguettes se placent horizontalement de façon à maximaliser la résistance de l'air. Par ailleurs l'orientation autour d'un axe vertical est a priori quelconque.

Vous pouvez vous faire une idée de cette situation en laissant tomber un brin d'herbe et une feuille d'arbre. La feuille tombe sensiblement "à plat" et le brin d'herbe horizontalement.

Voyons sur deux exemples les conséquences d'une telle orientation. Les faces terminales des baguettes et les faces latérales des plaquettes forment autant de miroirs verticaux. Un peu de géométrie montre que toutes les images du Soleil ont même hauteur apparente, égale à celle du Soleil. Du fait que les miroirs ont toutes les orientations possibles autour de l'axe vertical, l'ensemble des images est réparti sur un cercle parallèle à l'horizon, le "cercle parhélique". D'autre part la réflexion n'introduisant pas de dispersion, le cercle parhélique n'est pas irisé, ce qui aide à le différencier d'autres phénomènes (cf. infra).

Vous pouvez simuler le cercle parhélique à l'aide d'un crayon à bille transparent à section hexagonale et d'un projecteur de diapositives. Placez dans la porte diapositives un carton percé d'un trou de quelques millimètres de diamètre et formez-en l'image sur un écran. Interposez dans le faisceau le crayon à bille de façon que son axe soit vertical et faites le tourner autour de cet axe. Il apparaît une traînée horizontale semblable au cercle parhélique. Plus simplement, passez un doigt gras sur une lame porte-objet de microscope et placez-la dans le faisceau lumineux. Il apparaît sur l'écran une traînée blanche de même origine que le cercle parhélique.

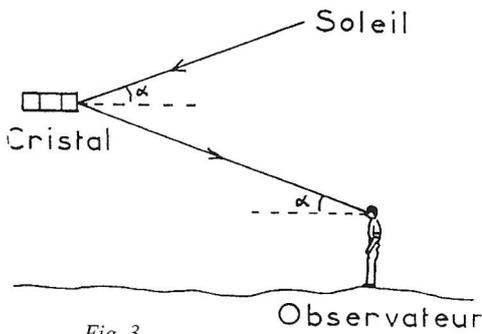


Fig. 3

En fait, l'horizontalité des cristaux n'est pas rigoureuse, leur axe pouvant s'écarter aléatoirement de quelques degrés par rapport à la verticale, ce qui déplace les images du Soleil. Or le calcul et l'expérience montrent que ce déplacement n'est pas symétrique, mais est plus prononcé dans le plan vertical contenant le Soleil que dans le plan perpendiculaire.

Le calcul complet de cet effet remarquable est trop long pour être exposé ici, bien qu'il ne soit pas très compliqué. Nous pouvons toutefois nous faire une idée de la question à l'aide du raisonnement suivant. Quand la normale (verticale) au plan du miroir tourne d'un angle α dans le plan vertical contenant le Soleil et l'observateur, le rayon réfléchi tourne d'un angle 2α . L'ensemble des images du Soleil forme une tache lumineuse dont le diamètre apparent vertical est le double, soit 4α . Par contre, quand la normale tourne du même angle α dans le plan perpendiculaire au précédent le déplacement apparent de l'image du Soleil est égal à α (figure 4).

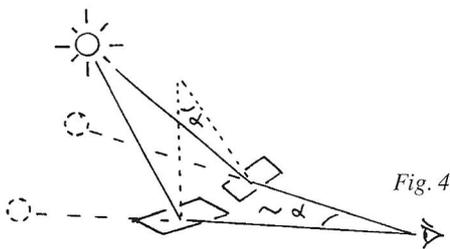


Fig. 4

Les images du Soleil sont réparties sur une surface allongée de grand axe vertical, un "pilier" ou "colonne" de lumière. C'est d'ailleurs le même effet qui donne naissance aux traînées de lumière sur la surface de la mer ou d'une rivière aux eaux moyennement agitées.

La figure 5 donne le principe d'une simulation de cet effet. Un petit miroir M dont le plan est incliné d'un

angle de quelques degrés sur l'horizontale grâce à une cale est déplacé de façon que la lumière issue de la source S soit toujours réfléchi vers le point O du support vertical. Le lieu du miroir est une courbe d'autant plus allongée que le point O est plus bas par rapport à la source S . Une variante "de luxe" consiste à matérialiser la courbe à l'aide d'un nombre suffisant de miroirs, par exemple ceux que vous trouverez en plaques chez la plupart des décorateurs.

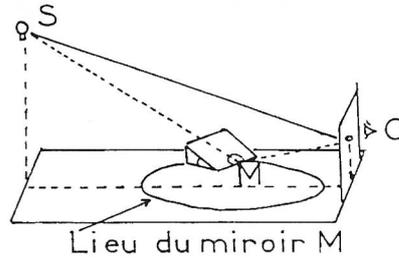


Fig. 5

Plus précisément, des simulations sur ordinateur montrent que les piliers de lumière observés au crépuscule, le Soleil étant alors au niveau de - voire sous - l'horizon sont plutôt dus aux plaquettes. Les colonnes lumineuses de forme voisine qui apparaissent de part et d'autre du Soleil lorsque celui-ci est plus haut sur l'horizon seraient plutôt dues aux faces latérales des baguettes. De telles colonnes, combinées à une portion de cercle circumzénithal peuvent très bien donner l'apparence d'une croix ou d'une épée "de feu", phénomène souvent rapporté par les traditions et les légendes.

Passons à la réfraction. Nous avons déjà dit que les cristaux de glace constituent des prismes d'angle au sommet 60° et 90° . La lumière qui traverse un prisme est déviée d'un angle au moins égal à l'angle de déviation minimum. Par suite, les pseudo-images du Soleil produites par réfraction sont toutes distantes de celui-ci d'un angle au moins égal à l'angle de déviation minimum, de l'ordre de 22° pour les prismes de 60° et de l'ordre de 46° pour les prismes de 90° (figure 6).

Qui plus est, l'angle de déviation varie peu au voisinage de la déviation minimum, ce qui se traduit par une accumulation de lumière dans cette direction, expérience bien connue depuis Newton.

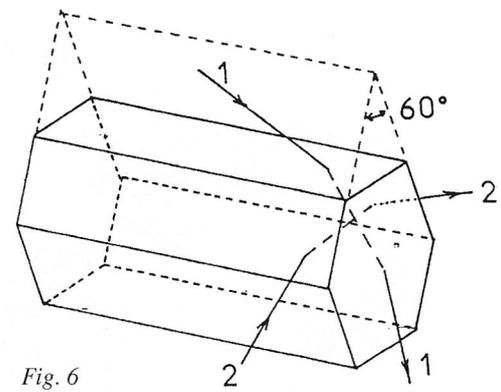


Fig. 6

Quand les prismes ont toutes les orientations possibles, cette accumulation entraîne l'apparition d'un ou deux cercles centrés sur le Soleil et de rayons angulaires égaux respectivement à 22° et 46° , angles de déviation minimum pour les deux types de prismes (figure 7).

En outre la lumière est dispersée aussi les cercles sont ils irisés, le rouge moins dévié étant à l'intérieur et le bleu à l'extérieur. Il est à noter que cette irisation n'est pas toujours très marquée, le fait que le diamètre apparent du Soleil n'est pas nul tendant à mêler les couleurs, et l'indice de réfraction de la glace variant très peu avec la longueur d'onde de la lumière.

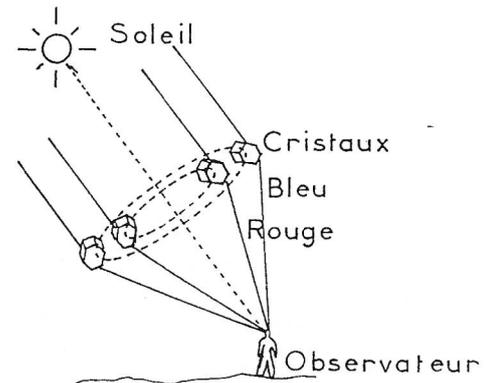


Fig. 7

Il est assez fréquent d'observer ces cercles, les "halos de 22° et de 46° ", qu'il ne faut pas confondre avec les couronnes dues à la diffraction que nous étudierons plus loin. Par ailleurs, chaque point du halo est dû à un cristal particulier. Il en résulte entre autres que si le nuage glacé n'est pas assez grand, le cercle est incomplet. L'usage veut qu'en pareil cas le nom de "nuage irisé" soit plutôt utilisé. Là encore, ce sont des phénomènes assez courants, soit dans les nuages eux-mêmes, soit dans les traî-

nées laissées par les avions à réaction volant à haute altitude.

Voici comment simuler un halo, toujours à l'aide du projecteur de diapositives et du carton troué dont vous formez l'image sur l'écran. Préparez une solution saturée à chaud, environ 200 gl d'alun et laissez la refroidir. Versez en à peu près 60 cm³ dans une cuve plate transparente (10x10x1 cm) et interposez cette cuve dans le faisceau lumineux. Ajoutez 5 cm³ d'alcool à 90° ou 10 cm³ d'alcool à 40° (eau de vie à fruits) puis mélangez à l'aide d'un agitateur. Après quelques instants, vous verrez se former sur l'écran un halo dû aux petits cristaux d'alun se déposant lentement. Il arrive que le halo soit précédé d'un brouillard dû aux plus gros cristaux qui tombent un peu plus rapidement. Avec un peu de chance, vous pourrez voir un second halo, formé par les mêmes cristaux différemment orientés. CORNU, à qui j'ai emprunté cette expérience donne pour le petit halo un rayon angulaire d'environ 10° et pour le grand de 20°, ce qui correspond à mes mesures. Il ne s'agit que d'ordres de grandeur, la composition du liquide et donc son indice de réfraction variant du début à la fin de l'expérience.

Quand les conditions atmosphériques sont telles que les axes des plaquettes de glace soient tous verticaux, elles donnent naissance, outre le cercle parhélique, et selon le mécanisme évoqué ci-dessus, à deux taches de lumière irisées situées de part et d'autre du Soleil les parhélies de 22°. Cette fois les arêtes des prismes sont toutes parallèles et il n'est plus possible d'observer le cercle complet. De la même façon les baguettes orientées donnent naissance aux parhélies de 46°. Notons qu'au fur et à mesure que le Soleil s'élève dans le ciel, les parhélies s'écartent de ces positions car les rayons qui les forment doivent traverser obliquement les prismes pour parvenir à l'oeil de l'observateur. Le calcul habituel de la déviation ne convient plus. Il doit être modifié, avec le résultat que nous venons d'indiquer.

Pour simuler une parhélie, reprenons notre projecteur de diapositives et remplaçons la cuve plate de l'expérience précédente soit par une cuve

prismatique à section triangulaire ou hexagonale soit par une cuve à section carrée.

De telles cuves sont assez faciles à construire, mais vous pouvez trouver dans le commerce des emballages en verre ou en plastique transparent de forme convenable, par exemple au rayon épicerie ou confiserie d'un supermarché.

Il est commode de disposer en outre d'un support tournant d'axe vertical, pas trop rapide. Disons de quelques tours/s pour fixer les idées.

Remplissez d'eau votre cuve et placez la sur le support de façon que son axe soit vertical et qu'elle intercepte le faisceau de lumière. Lors de la rotation, vous verrez apparaître les parhélies de part et d'autre de l'image du trou, à 22° ou à 46° selon la forme de la cuve (l'indice de réfraction de l'eau est pratiquement égal à celui de la glace). Vous verrez aussi bien entendu le cercle parhélique.

A défaut de cuve triangulaire ou hexagonale, remplissez d'eau le corps du crayon à bille utilisé pour la simulation du cercle parhélique. L'expérience marche encore, quoiqu'un peu moins bien.

Je me suis limité à un petit nombre d'exemples, mais il existe une grande variété d'arcs et de halos, attribués à des réflexions ou des réfractions plus complexes dans les cristaux de glace, et apparaissant ou non au gré des conditions atmosphériques (figure 8).

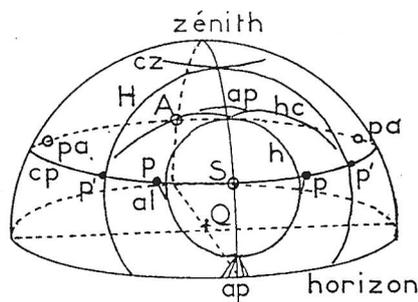


Fig. 8

II-4 ARC-EN-CIEL

Outre les cristaux de glace, des gouttes d'eau peuvent posséder une taille suffisante pour réfracter la lumière, et c'est ainsi que du mariage du Soleil et de la pluie naît l'arc-en-ciel, incontestablement le plus célèbre des "météores lumineux" depuis qu'Homère l'a baptisé du joli nom d'"écharpe d'Iris".

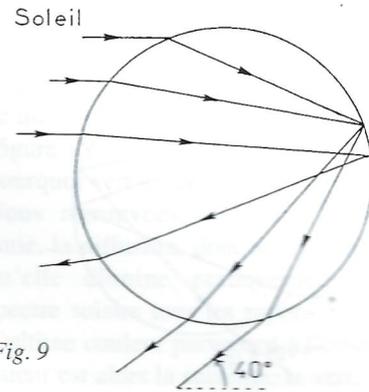


Fig. 9

Les rayons lumineux issus du Soleil pénètrent donc dans une goutte d'eau, s'y réfléchissent, puis en ressortent (figure 9). Pour que le rayon ainsi dévié puisse pénétrer dans l'oeil de l'observateur, celui-ci doit tourner le dos au Soleil. De plus, la hauteur de l'astre au dessus de l'horizon ne doit pas dépasser une quarantaine de degrés. Dans nos contrées, l'arc-en-ciel est le plus souvent observé en fin d'après-midi, après une ondée ou un orage, ceux-ci se déplaçant en général d'Ouest en Est.

Si nous traçons ainsi le devenir d'un grand nombre de rayons parallèles, nous constatons que la majorité d'entre eux ressortent en faisant le même angle, voisin de 40°, avec la direction des rayons incidents. Il s'agit bien entendu d'un minimum de déviation équivalent de celui que nous avons déjà rencontré dans les prismes de glace. L'observateur reçoit davantage de lumière provenant de cette direction et a donc l'impression qu'il existe un arc lumineux de rayon angulaire voisin de 40°.

Par ailleurs, l'indice de réfraction de l'eau varie avec la longueur d'onde de la lumière, comme l'inverse carré de celle-ci en première approximation. Il en résulte que les rayons rouges sont déviés sous un angle un peu plus important et les bleus sous un angle un peu plus faible que les autres (figure 10). A chacune des couleurs qui composent la lumière du Soleil est associé un arc particulier, observé dans une direction particulière. L'arc-en-ciel est irisé, avec le rouge à l'extérieur et le bleu à l'intérieur.

Ajoutons que chaque goutte fournit sa portion (minuscule!) d'arc-en-ciel, les rayons qu'elle dévie devant ensuite passer dans l'oeil de l'observateur. Ceci explique que l'arc ne soit pas

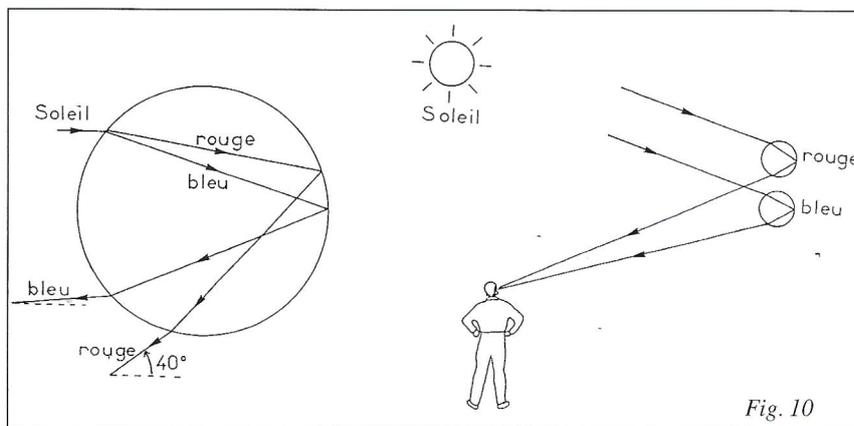


Fig. 10

complet si l'ondée qui le génère est trop peu étendue.

La plupart des cours de physique de niveau élémentaire ou des ouvrages de "physique amusante" décrivent la réalisation d'un "arc-en-ciel" à l'aide d'un ballon de verre voire d'un simple verre d'eau. Outre que la seconde expérience n'a pas grand chose à voir avec l'arc-en-ciel à part la dispersion de la lumière, ces expériences en éliminent le facteur essentiel, la coopération d'une multitude de gouttes d'eau.

Le plus simple est encore de réaliser un véritable arc-en-ciel grâce à un tuyau d'arrosage et en profitant d'une journée ensoleillée...

L'histoire ne s'arrête pas là : une partie de la lumière reste dans la goutte, s'y réfléchit une seconde fois avant de ressortir un peu plus loin. (figure 11). Il en résulte une nouvelle accumulation de lumière, sous un angle d'environ 50°, et de nouveaux arcs colorés, avec le bleu à l'extérieur cette fois, en raison de la double réflexion interne. Cet arc, dit secondaire, est beaucoup moins intense que le précédent, au point de ne pas toujours être visible.

Nous pouvons grâce à ce modèle interpréter un autre aspect de l'arc-en-

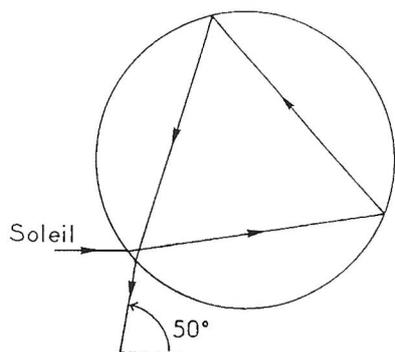


Fig. 11

ciel, la bande sombre d'Alexandre, du nom du philosophe grec Alexandre d'Aphrodisias (ca. 200 de notre ère). Du fait que les arcs-en-ciel correspondent à des minimums de déviation, il n'y a pas de rayons lumineux renvoyés sous des angles supérieurs à 40° et inférieurs à 50°. La région correspondante du ciel, c'est à dire la bande comprise entre l'arc primaire et l'arc secondaire, paraît donc plus sombre que le reste. Notons qu'Alexandre d'Aphrodisias, ayant tenté d'expliquer l'origine de l'Arc-en-ciel à partir de prémisses fausses avait abouti à la conclusion que cet espace devait être plus brillant que le reste du ciel...

Il est possible d'étendre le raisonnement, en même temps que le nombre de réflexions, à d'autres arcs. Ceux-ci n'ont jamais été observés dans la nature, mais ont été mis en évidence jusqu'au vingt-troisième - en laboratoire.

Des modèles plus élaborés, reposant sur le modèle ondulatoire de la lumière, permettent d'expliquer d'autres caractéristiques de l'arc-en-ciel, en particulier les anneaux surnuméraires, minces bandes pourpres visibles à l'intérieur de l'arc primaire, et la variation de l'aspect de l'arc avec la taille des gouttes d'eau. Nous n'aborderons pas ces points, qui déborderaient trop largement le cadre de cet exposé.

II-5 MIRAGES RAYON VERT

La loi fondamentale de l'optique des rayons lumineux, le principe de propagation rectiligne de la lumière, n'est utilisable que dans un milieu homogène. Si l'indice de réfraction varie d'un point à l'autre, les rayons lu-

mineux sont courbés, s'infléchissant vers les régions d'indice élevé. Or l'indice de réfraction de l'air est proportionnel à sa densité (loi de Gladstone) donc inversement proportionnel à sa température aussi pouvons nous prévoir l'apparition de phénomènes optiques particuliers.

L'un des plus communs est sans conteste la scintillation des étoiles. Pour de multiples raisons, la température de l'atmosphère varie rapidement et aléatoirement, ce qui entraîne des variations non moins rapides et non moins aléatoires de la direction des rayons lumineux. L'image d'une source lumineuse paraît fluctuer en direction et en intensité, ce qui constitue la scintillation. Toutefois ces variations sont habituellement de faible amplitude et n'ont d'effet apparent que sur des sources de très petit diamètre apparent, en pratique les étoiles et, dans certains cas les planètes. Plus importantes et conduisant donc à des effets plus remarquables sont les fluctuations des propriétés de l'air au dessus d'un feu, d'un brasero ou d'une carrosserie surchauffée, tous phénomènes d'observation courante.

Pour simuler ce phénomène, faites passer un faisceau laser au dessus d'une plaque métallique chauffée. La trace du faisceau sur un écran se déplace rapidement et aléatoirement.

Outre ces fluctuations, il peut exister localement des gradients stables d'indice de faible étendue verticale, quelques décimètres ou quelques mètres. Ils ont pour origine, soit une inversion de température en altitude, soit un réchauffement ou un refroidissement de l'air au niveau du sol. Un sol ou une nappe d'eau chauds créent un gradient de température dirigé vers le haut, donc un gradient d'indice dirigé vers le bas, ce qui courbe les rayons lumineux vers le haut. Inversement, un sol ou une nappe d'eau froids les courbent vers le bas (figure 12).

Dans un tel milieu, les divers rayons lumineux issus d'un même point de l'objet suivent souvent des trajets différents avant d'atteindre l'oeil de l'observateur, ce qui donne naissance à plusieurs images, tantôt droites, tantôt renversées, selon la façon précise dont l'indice de l'air varie avec l'altitude (figures 13).

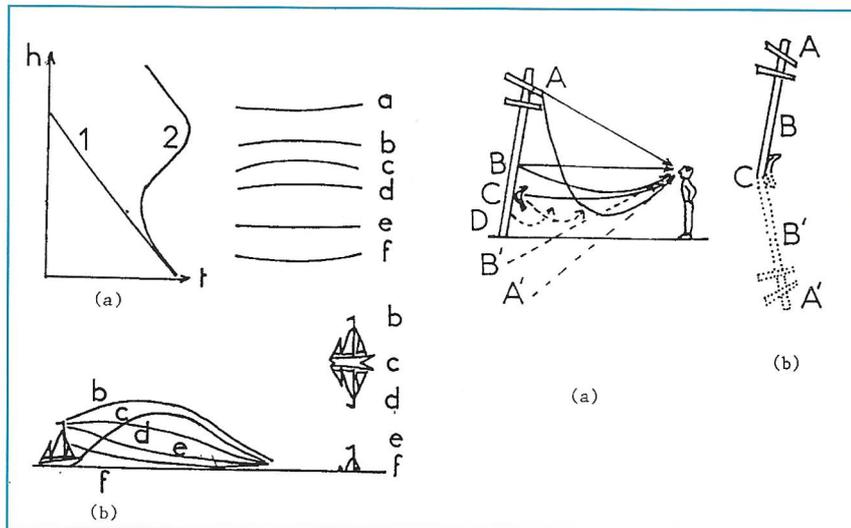


Fig. 12

Par ailleurs ces images peuvent être déformées, ce qui est probablement à l'origine de nombreuses légendes concernant des monstres marins ou des vaisseaux fantômes (figure 13). Notons que le mirage dit "inférieur", produit au voisinage d'un sol chaud est d'observation courante dans nos régions, sur les routes asphaltées ou bétonnées. Le paramètre important étant le gradient de température plus que sa valeur moyenne, ce type de mirage est à peu près aussi fréquent en hiver qu'en été.

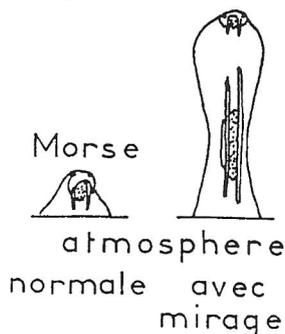


Fig. 13

Il pose d'ailleurs un intéressant problème de thermodynamique : comment un tel gradient de température peut-il se maintenir, malgré le brassage de l'air résultant du passage des voitures ? Il est assez difficile de réaliser en laboratoire un gradient de température assez stable pour une démonstration. Il est plus pratique de le remplacer par un gradient de concentration. Dans une cuve plate (10x10x1cm), versez une couche d'eau puis superposez avec précautions une couche d'alcool. Faites ensuite arriver un faisceau laser horizontal au niveau

de l'interface eau/alcool et observez qu'il se courbe nettement vers le haut. Inversement, la superposition d'une couche de glycérine ou de sirop de sucre et d'une couche d'eau crée une courbure vers le bas.

Indépendamment de ces fluctuations, il existe une variation d'ensemble de la densité de l'air avec l'altitude, liée à la diminution de la pression. Le gradient d'indice qui en résulte courbe vers le sol les rayons lumineux et modifie la position apparente des objets célestes. C'est la réfraction astronomique, bien connue des astronomes. Plus près de nous, si j'ose dire, il provoque deux phénomènes curieux, l'un d'observation courante, l'aplatissement du Soleil couchant, l'autre plus rare, le rayon vert.

Le gradient d'indice n'est pas uniforme, étant d'autant moins prononcé que l'altitude est plus élevée en raison de la décroissance exponentielle de la pression avec l'altitude. Par suite, les rayons lumineux issus du bord inférieur du Soleil sont plus courbés que ceux issus du bord supérieur, ce qui diminue le diamètre vertical apparent (figure 14). Horizontalement, par contre, la variation d'indice est négligeable, et le diamètre apparent n'est pas modifié.

L'atmosphère, compte tenu de son gradient d'indice, se comporte comme un prisme d'arête horizontale et de base confondue avec le sol. Le cercle lumineux du Soleil, vu à travers un tel prisme paraît irisé, le bleu étant du côté de l'arête et le rouge vers la base. Quand le Soleil se

couche, l'horizon masque successivement toutes les couleurs et ne laisse finalement subsister que la dernière, ce qui donne naissance au rayon vert (figure 15).

Pourquoi vert et non bleu ?

Nous retrouvons ici notre vieille amie, la diffusion, dont nous verrons qu'elle élimine pratiquement du spectre solaire tous les rayons bleus. L'ultime couleur parvenant à l'observateur est alors la suivante, le vert.

Si les choses étaient aussi simples, le rayon vert devrait être d'observation courante, pratiquement quotidienne. En fait, la dispersion par l'atmosphère est très faible, de l'ordre d'une fraction de minute d'arc, si bien qu'il est difficile de bien séparer les couleurs. En pratique, il faut que l'horizon soit bien dégagé, que le ciel soit bien clair et, semble-t-il, qu'un mirage élargisse à ce moment l'image du Soleil pour que le rayon vert apparaisse.

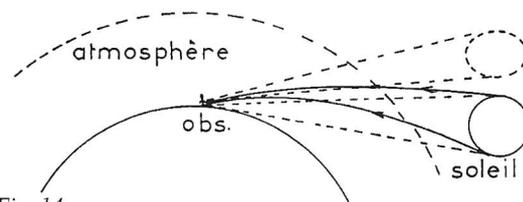


Fig. 14

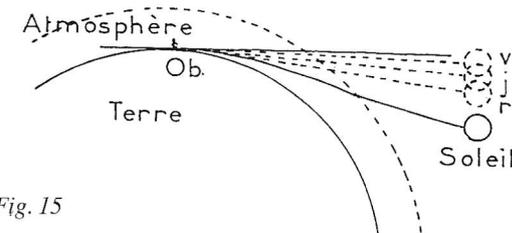


Fig. 15

L'expérience suivante peut vous donner une idée de la façon dont les choses se passent. Collez un disque de papier blanc sur un support noir et observez-le à travers un prisme de verre. Vous verrez les irisations bleue et rouge de part et d'autre du cercle. Maintenant, passez un carton mince de la base vers l'arête du prisme, entre celui-ci et le disque. Vous verrez disparaître successivement le bord rouge, puis le cercle blanc et il ne subsistera que le bord bleuté.

III - L'ONDE LUMINEUSE

Le modèle du rayon lumineux est impuissant à expliquer l'ensemble des phénomènes et doit céder la place à

un modèle plus élaboré, l'onde lumineuse. Nous nous représentons alors la lumière comme une onde (électromagnétique en fait) qui se propage dans tout l'espace suivant le principe de Huyghens-Fresnel.

Il n'existe pas dans l'atmosphère de structures assez régulières pour donner naissance à des phénomènes analogues à ceux produits par les réseaux ou les empilements de couches minces et d'observation courante dans le domaine minéral (nacre, opale précieuse...) ou animal (plumes de paon, papillons, scarabées...). Par contre, de nombreux effets peuvent être interprétés à partir des modèles simples de diffraction ou de diffusion. Notons au passage qu'il n'existe pas de limite tranchée entre la diffusion et la diffraction. Pour respecter un usage assez ancien et encore courant dans la littérature spécialisée, nous utiliserons plutôt le premier pour traduire l'effet de petites particules et le second celui de grosses, la longueur d'onde de la lumière étant l'étalon de mesure.

Outre les molécules des gaz qui constituent l'air, l'atmosphère contient en permanence, encore qu'en proportion très variable selon les époques et les endroits, une grande diversité de particules dont les tailles s'échelonnent d'une fraction de micromètre à quelques millimètres. Nous avons déjà rencontré les plus grosses, les gouttes de pluie et les cristaux de glace, dont la taille est suffisante pour que nous ayons pu nous contenter du modèle simple du rayon lumineux. Il convient d'y ajouter les minuscules gouttes d'eau des nuages et des brumes, les aérosols, les poussières d'origine terrestre : sables soulevés par le vent, cendres volcaniques, fumées dues à l'activité humaine.... Les plus grosses, dont les dimensions sont de l'ordre de quelques

dizaines à quelques centaines de longueurs d'onde, diffractent la lumière et sont à l'origine de plusieurs "météores lumineux", selon la jolie expression du siècle dernier. Les plus petites, dont la taille est de l'ordre de la longueur d'onde, la diffusent créant d'autres "météores", dont certains sont d'observation quotidienne.

III-1 COURONNES ET GLOIRES

Les gouttes d'eau sphériques qui constituent les nuages ou le brouillard se comportent comme autant d'ouvertures circulaires et nous pouvons leur appliquer, avec une très bonne approximation, les résultats indiqués par les théories élémentaires. La lumière est répartie sur des anneaux concentriques au Soleil, irisés, avec le rouge à l'extérieur et le bleu à l'intérieur (figure 16).

Ces anneaux sont les "couronnes" et sont très courants à observer si vous prenez garde de ne pas regarder directement le Soleil pour ne pas être ébloui, mais son reflet dans un morceau de verre noir ou une cuvette d'eau.

Leur diamètre angulaire est inversement proportionnel à la taille de la particule et ne dépasse d'ordinaire pas quelques degrés, ce qui est très inférieur aux dimensions des halos. La variété des diamètres des gouttes dans un même nuage ainsi que la taille apparente du Soleil se conjuguent pour que les couleurs se recouvrent, si bien qu'en général les irisations sont peu prononcées.

Comme pour les arcs-en-ciel et les halos, chaque élément de couronne est fourni par une goutte particulière et il arrive que la couronne ne soit pas complète si le nuage est trop petit. Par ailleurs la théorie de la diffraction indique une rapide décroissance de l'intensité lumineuse dès le deuxième anneau, aussi est il rarissime d'en voir plusieurs.

Signalons toutefois que plusieurs observateurs ont signalé l'existence de couronnes d'assez grand diamètre, de l'ordre d'une dizaine de degrés, les anneaux de Bishop, du nom du Révérend Père Bishop qui les observa à Honolulu juste après l'éruption du Krakatoa en 1883. La tendance actuelle est de les attribuer à des aérosols stratosphériques d'origine volcanique.

Vous pouvez réaliser de très jolies couronnes en saupoudrant une plaque de verre d'une pincée de poudre de lycopode ou de spores de vesse de loup, puis en l'interposant dans le faisceau lumineux de votre projecteur de diapositives muni d'un petit trou source.

La prochaine fois que vous verrez une couronne, regardez bien. Outre la structure à grande échelle que nous venons de décrire, il apparaît une structure fine donnant une apparence granulaire et due à des interférences aléatoires.

La théorie classique de la diffraction par une grand nombre d'ouvertures identiques réparties au hasard, comme les gouttes d'eau d'un nuage, admet que les figures individuelles de diffraction sont superposées en intensité, sans interférer entre elles. Ceci n'est pas tout à fait exact. Un calcul plus précis tenant compte des phases aléatoires montre que l'intensité résultante présente des fluctuations importantes à courte distance, ce qui donne naissance à la structure granulaire, dénommée granularité cohérente, ou tacheture, ou tavelure, ou plus communément speckle selon l'usage anglo-saxon.

Bien qu'observée depuis longtemps, par Newton et le duc de Chaulnes entre autres, la granularité cohérente n'a été vraiment étudiée et utilisée que depuis l'avènement du laser.

La théorie élémentaire de la diffraction suppose explicitement que la particule diffractante est située entre la source de lumière et l'observateur. Y a-t-il quelque chose à voir de l'autre côté, c'est à dire sous un angle de 180° par rapport à la direction de propagation de la lumière ?

Pour nous, oui. Les gouttes d'eau diffractent la lumière aussi bien vers l'arrière que vers l'avant. A un phénomène aussi remarquable nous nous devons de réserver une brillante appellation, et c'est la gloire (figure 17). Le mécanisme de sa formation n'est pas encore complètement élucidé mais la théorie généralement admise est la suivante. La lumière qui pénètre sous l'incidence rasante dans une goutte d'eau est réfractée, réfléchi (comme dans un arc-en-ciel) puis réfractée à nouveau et transportée par une onde de surface de façon à repar-

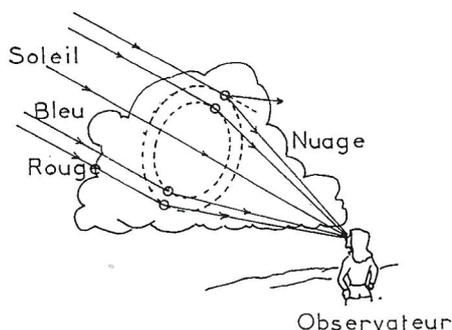


Fig. 16

tir vers la source de lumière (figure 17). Une onde de surface s'apparente aux ondes évanescentes et est bien connue dans la théorie et la pratique de la propagation des ondes électromagnétiques dans les conducteurs, le décalage qu'elle entraîne pour le rayon lumineux étant une variante de l'effet Goos-Hanchen.

Il en résulte que la lumière renvoyée vers la source lumineuse paraît provenir d'un mince anneau de diamètre égal à celui de la goutte d'eau. Le calcul de l'intensité de la lumière diffractée par un ensemble de tels anneaux répartis au hasard donne des résultats conformes à l'expérience. Comme pour la couronne et pour les mêmes raisons, les anneaux de diffraction sont irisés avec le rouge vers l'extérieur. Toutefois, dans le cas de la gloire, l'intensité décroît moins vite d'un anneau au suivant, et il est courant d'en observer plusieurs.

L'observateur étant situé entre le Soleil et le nuage, la gloire entoure l'ombre de sa tête (spectre du Brocken) mais pas celles de ses compagnons, ce qui constitue un spectacle exceptionnel. L'un des premiers compte-rendus est celui du sculpteur Benvenuto Cellini, qui y vit - en toute modestie - la marque de son génie. De nos jours il est courant d'observer la gloire depuis un avion, ce qui la ramène à de plus justes proportions...

Pour la petite histoire, rappelons que Wilson imagina la chambre à brouillard, détecteur de particules élémentaires longtemps utilisé en physique des hautes énergies, pour tenter de recréer la gloire en laboratoire et en élucider le mystère. C'est tout à fait fortuitement qu'il se rendit compte que son appareil était mieux adapté à la physique nucléaire qu'à l'optique atmosphérique...

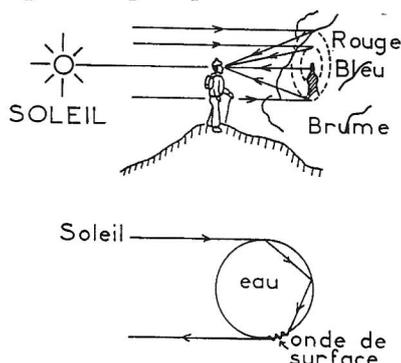


Fig. 17

III-2 CIEL BLEU - SOLEIL BLEU

La diffraction de la lumière par les gouttelettes d'eau ou autres particules de taille suffisante est commodément décrite à partir du principe de Huyghens-Fresnel. Or celui-ci n'est qu'un cas particulier d'une théorie plus générale, la théorie de la diffusion, basée sur les équations fondamentales de l'électromagnétisme, les équations de Maxwell. Sans entrer dans le détail des calculs, nous allons donner quelques indications permettant d'interpréter ce phénomène fondamental et de décrire quelques uns des effets particuliers auxquels il donne naissance.

Le champ électrique de l'onde incidente - la lumière du Soleil dans le cas présent - exerce une force périodique sur les électrons liés aux atomes constituant les molécules d'air et les particules en suspension dans l'atmosphère. Chaque électron ainsi mis en mouvement réémet une onde électromagnétique de même fréquence que l'onde incidente, ce qui constitue la diffusion à proprement parler.

L'électron mis en mouvement se comporte comme un courant électrique d'autant plus intense que le mouvement est plus rapide, donc que la fréquence de l'onde excitatrice est plus élevée. Plus le courant électrique est intense, plus le champ électromagnétique créé est important comme chacun sait. En d'autres termes, l'intensité de la lumière diffusée est d'autant plus grande que la lumière incidente est de fréquence plus élevée, c'est à dire de longueur d'onde plus courte. Plus précisément, cette intensité varie comme l'inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde, si bien que les radiations bleues sont à peu près seize fois plus diffusées que les rouges. Par ailleurs, la lumière diffusée est émise de façon pratiquement isotrope autour de l'électron.

Ceci concerne un électron isolé. La lumière diffusée par une particule est déterminée par l'interférence de toutes ces ondes "élémentaires", ce qui crée d'importantes variations tant spectrales que spatiales par rapport au schéma précédent. Ainsi, pour une

"grosse" particule, de quelques dizaines de micromètres de diamètre, nous retrouvons les résultats du modèle simple de la diffraction.

Envisageons à présent le cas des "petites" particules, auxquelles nous ne pouvons pas appliquer les calculs de diffraction ni, a fortiori, le modèle du rayon lumineux.

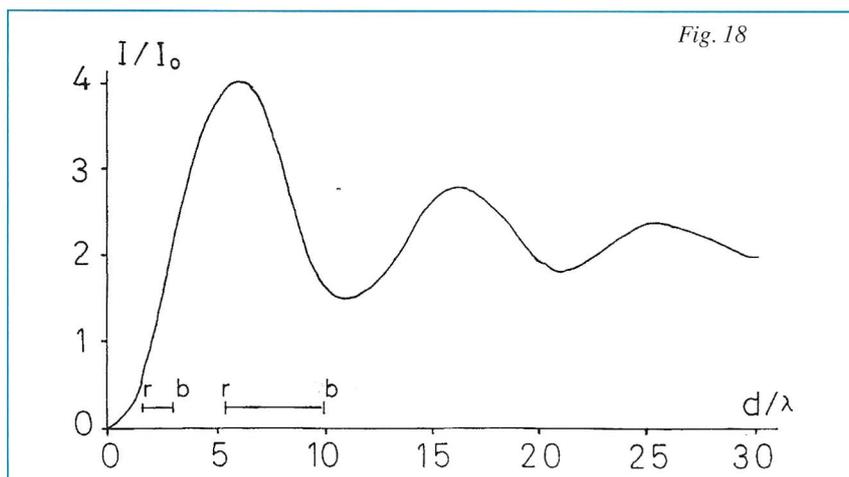
Le cas le plus simple est celui où les dimensions des particules sont inférieures à toutes les longueurs d'onde de la lumière visible, la limite communément admise étant d'une cinquantaine de nanomètres (environ la dixième de la longueur d'onde moyenne) soit une agglomération de quelques milliers d'atomes au plus. En pratique, cette catégorie inclut les molécules des gaz ainsi que les plus petites gouttes d'aérosols et particules présents dans l'atmosphère. Tous les électrons sont soumis au même instant au même champ électrique si bien que les "ondelettes" réémises par les divers électrons sont toutes en phase. La particule se comporte à très peu de choses près comme un électron isolé et les conclusions précédentes demeurent applicables.

Un tel milieu paraît bleu quelle que soit la direction d'observation, sauf bien entendu celle de la source de lumière qui, elle paraît jaune ou même rouge si l'épaisseur traversée est suffisante. Ce mode de diffusion, dite de Rayleigh ou de Tyndall est d'observation quotidienne - ou presque - puisqu'il est responsable de la couleur bleue du ciel et des splendeurs de certains couchers de Soleil. C'est lui aussi qui est à l'origine de "la ligne bleue des Vosges", ou des "montagnes bleues" un peu partout dans le monde.

De nombreux milieux permettent d'observer une diffusion bleue. Parmi les plus immédiatement accessibles, je citerai une solution diluée de lait, de l'eau savonneuse, de la fumée de tabac... et aussi les yeux bleus, les veines du poignet, la plupart des plumes bleues des oiseaux...

Dès que le diamètre de la particule est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière, soit un demi-micromètre en chiffres ronds, les ondes "élémentaires" ne sont plus en phase et le modèle précédent ne conduit plus à des résultats satisfai-

sants. Il doit être remplacé par une théorie plus élaborée, celle de Mie. Pour des particules de taille voisine de 0,4 à 0,5 micromètres et d'indice de réfraction comparable à celui de l'eau, cette théorie prévoit un résultat curieux : la répartition spectrale de la lumière diffusée est inversée par rapport à celle décrite à l'aide du modèle de Rayleigh. En d'autres termes, les radiations bleues, déjà en état d'interférence destructive sont très peu diffusées tandis que les rouges, encore en état d'interférence constructive le sont bien davantage (figure 18). Si l'atmosphère se comportait de cette façon, nous verrions un Soleil bleuâtre dans un ciel rouge orangé.



Si étrange que puisse paraître une telle situation, elle a effectivement été observée à diverses reprises, par exemple en 1883 lors de l'explosion de Krakatoa, en 1960 lors de gigantesques incendies de forêt au Canada, et, selon certaines sources, de temps en temps à Pékin quand le vent du Nord soulève de la poussière de loess. Les gouttes d'eau formant les nuages ou la brume ont un diamètre de l'ordre de quelques micromètres, bien supérieur aux longueurs d'onde des radiations visibles. La théorie de Mie montre qu'alors la répartition spectrale de la lumière diffusée est pratiquement identique à celle de la lumière incidente. Là encore, il s'agit d'observations banales : les nuages sont blancs en cours de journée et roses ou orangés à l'aube ou au crépuscule.

Par ailleurs l'intensité de la lumière diffusée présente un maximum dans la direction de la lumière incidente et un second, moins accentué, dans la

direction opposée (figure 19). Nous retrouvons ici les conditions indiquées tout au début de l'exposé, qui nous permettent de voir les rais de lumière et le spectre du Brocken. Ce sont aussi celles qui réduisent la visibilité et gênent la conduite par temps de brouillard...

Pour terminer, indiquons deux phénomènes moins fréquents, combinant les divers modes de diffusion : le second crépuscule et la lumière pourpre.

Les couleurs du crépuscule sont dues à la diffusion de la lumière du Soleil par des nuages convenablement situés (figure 20). Au coucher du Soleil, la lumière traverse une forte

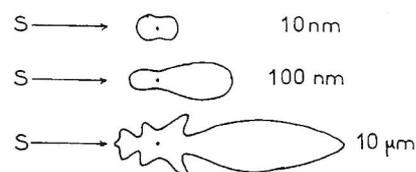


Fig. 19

épaisseur d'atmosphère et les radiations bleues et même vertes sont fortement diffusées par les molécules d'air. La lumière qui tombe sur les nuages est donc orangé-rouge, de même que celle qu'ils diffusent. Quand le Soleil est suffisamment bas sous l'horizon, ces nuages de basse altitude, quelques kilomètres au plus, ne sont plus éclairés et la nuit tombe. Certaines éruptions volcaniques intenses créent à haute altitude, quelques dizaines de kilomètres, une mince couche d'aérosols qui diffusent aussi la lumière du Soleil. Etant plus haute, elle reste éclairée plus tard par le Soleil ce qui prolonge le crépuscu-

le, ou même le renouvelle quand la géométrie de l'ensemble s'y prête. Quand l'atmosphère contient une concentration suffisante de petites particules, le plus souvent à la suite d'éruptions volcaniques, il peut arriver que la lumière bleue qu'elles diffusent soit d'intensité comparable à la lumière rouge diffusée par les nuages au crépuscule. Le paysage est alors baigné par le mélange des deux, ce qui donne une lumière dite "pourpre", en fait plutôt violacée que rougeâtre. J'ai eu la chance d'en être témoin, à plusieurs reprises, et je puis vous garantir que l'effet en est saisissant. Nous voici au terme de notre promenade, encore que nous n'ayons pas tout exploré, loin s'en faut. J'ai cru bon d'insister sur les effets lumineux qui ne font intervenir que les modèles les plus simples de comportement de la lumière, et qui sont peut-être plus proches de vos préoccupations immédiates.

Quoi qu'il en soit, j'espère vous avoir incité à ouvrir de temps en temps les rideaux de votre salle de cours et à inviter la Nature à participer à vos leçons d'optique.

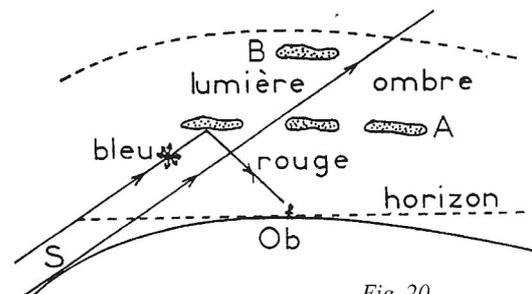


Fig. 20

III - OBSERVATION ET MESURE

Les "météores lumineux" sont l'un des rares domaines encore offerts au physicien amateur désireux de se tremper dans l'atmosphère de la recherche scientifique. Il suffit de beaucoup de patience et d'attention, et de quelques appareils aussi simples que peu onéreux.

Le premier et le plus immédiat est votre corps : vos yeux pour voir et vos mains pour déterminer rapidement un ordre de grandeur. Rappelons que dans ce domaine, toutes les dimensions sont angulaires : diamètre

d'un halo, d'un arc-en-ciel, d'une couronne, écart d'une parhélie ... A titre indicatif, à bras tendu :

La largeur de l'auriculaire correspond à 1°

La largeur du pouce 2°

La largeur des trois doigts médians joints 5°

La longueur de l'index 10°

La main ouverte, du pouce à l'auriculaire 25°

Les "anciens" instruments d'astronomie comme l'arabesstrille vous permettent des mesures plus précises et sont aisés à réaliser (figure 21).

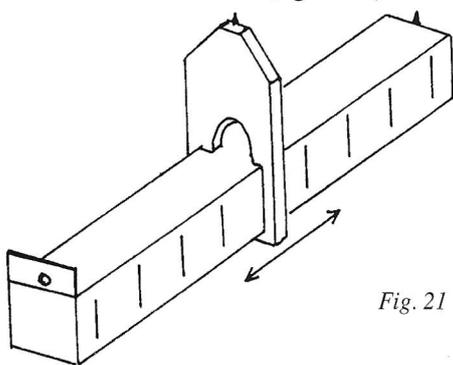


Fig. 21

Un appareil photo permet de garder une trace des phénomènes. Les conditions de prise de vues étant souvent assez éloignées de celles prévues par les constructeurs, il est préférable de choisir un modèle entièrement réglable et de ne pas hésiter à multiplier les clichés pour choisir ensuite le meilleur. Un objectif de courte focale (35 mm ou même 28 mm) et surtout de grand champ angulaire convient dans la plupart des cas. Choisissez de préférence un modèle simple, léger et peu encombrant, que vous puissiez avoir constamment à portée de main. Le plus souvent une pellicule inversible en couleurs (pour diapositives) donne les meilleurs résultats et il existe à présent des "kits" de développement vous permettant d'obtenir plus rapidement vos photographies.

Un petit morceau de feuille polarisante ou, à défaut, un petit morceau de verre noir vous permettront d'observer les modifications correspondant à celles de l'état de polarisation de la lumière, modifications que nous n'avons pas décrites ici.

Enfin, n'oubliez pas le plus important : un cahier où vous noterez avec le plus de détails possibles vos observations : lieu, heure (GMT de préférence), conditions atmosphériques...

IV - POUR EN SAVOIR PLUS

Il n'existe pas d'ouvrage récent, en français, traitant d'optique atmosphérique. Au hasard des bibliothèques, peut-être pourrez vous trouver des "ancêtres".

C. FLAMMARION *Atmosphère - Météorologie populaire*

Hachette Paris 1888

MARGOLLE - ZURCHER

Les météores

Hachette Paris 1867

E. MASCART.

Traité d'Optique (tome III)

Gauthier Villars Paris 1893

Aborde plus volontiers l'aspect mathématique que les précédents

Vous trouverez des indications ponctuelles dans les ouvrages et articles suivants :

J.P. MAURY *L'Arc-en-ciel*

Ophrys Paris 1986

J. WALKER

Le Carnaval de la Physique

Balland Paris 1980

Les Phénomènes naturels

Belin Paris 1978

Michel HENRY *Les réseaux colorés*

La Recherche Janvier 1981 p.24

Michel HENRY *Images Insolites*

La Recherche Mai 1983 p. 615

Michel HENRY

Mirages, Halos et Gloires

Revue du Palais de la découverte

Novembre 1987 p. 20

Les trois "bibles", pour ceux qui lisent l'anglais :

R. GREENLER

Rainbows, Halos and Glories

Cambridge University Press

New York 1980

Agrément d'une extraordinaire collection de photographies et de simulations sur ordinateur.

M. MINNAERT

Light and Color in the Outdoors

Springer Verlag Berlin 1993

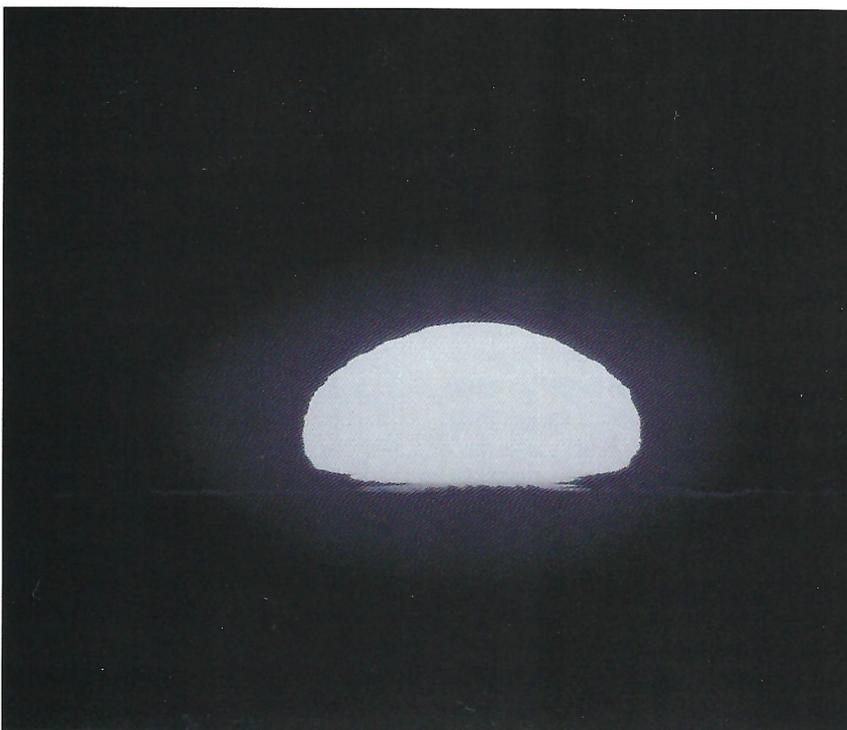
Le classique des classiques, dans une réédition récente.

H.C. Van de HULST

Light scattering by small particles

Dover New York 1981

Il vous apprendra tout sur la diffusion et la diffraction, mais il est du niveau de la maîtrise, voire du 3^e cycle.



Déformation de l'image du soleil au couchant (Photo Stéphane Anglaret)

Au Musée d'Histoire Naturelle H. Lecoq à Clermont-Ferrand

du 14 mars au 25 juin 1995

AUX ORIGINES DE L'HOMME

Les panneaux de cette exposition nous font revivre l'évolution de l'homme depuis ses lointaines origines. L'homme est un Primate dont les débuts remontent à ADAPIS, vrai Primate primitif (Prosimien arboricole, à pied préhensile) de 30 à 40 millions d'années. Il fut décrit par Cuvier, et découvert dans les phosphorites du Quercy.

Mais il faut attendre 6 millions d'années pour trouver les premiers véritables membres de la famille humaine que sont les AUSTRALOPITHEQUES, dont LUCY est - en Ethiopie - un des plus anciens, sinon le plus ancien connu : elle a 3 millions d'années.

De là, après passage par les Homi-
noides, se dégagent :

- HOMO HABILIS : de 1,6 à 3 millions d'années, le premier représentant du genre humain.
- HOMO ERECTUS : de 0,2 à 1,7 millions d'années, le gardien du feu.
- HOMO NEANDERTALENSIS : de 30 à 200 000 ans, qui enterre ses morts avec des offrandes.
- HOMO SAPIENS SAPIENS, dont nous sommes des spécimens...

Cet Homo Sapiens Sapiens est très jeune : 92 000 ans en Israël, 40 000 ans en Chine, 35 000 ans en France (l'homme de CRO-MAGNON). Il dessine, peint, sculpte, et - avec l'invention de l'écriture - met fin à la préhistoire.

L'exposition retrace cette évolution, avec quelques étapes de plus et les caractères de chacun des jalons, ainsi que ses aléas, et nous conduit à la genèse de l'écriture - étape importante

s'il en est - et aux divers aspects de l'industrie humaine.

Au total, elle nous permet d'assister avec émotion à l'apparition des premiers représentants du genre humain. La Direction Régionale des Affaires Culturelles Auvergne (DRAC) complète les panneaux en évoquant cette évolution, qu'elle illustre à partir des sites régionaux.

EXPOSITION ITINERANTE

Exposition Pasteur : réalisée par l'Institut Pasteur à l'occasion du centenaire de la mort de Pasteur. Cette exposition comprenant 11 panneaux plastifiés (100 x 66), un film vidéo et divers documents est mise à la disposition des établissements scolaires et des centres culturels qui en feront la demande à l'ADASTA.

Location pour une semaine : 200 F ;
deux semaines : 300 F (port en plus).

Au Musée Crozatier au Puy-en-Velay

Principales expositions et manifestations prévues en 1995

17 MARS 95

Réouverture des Salles Pierre & Alexandre Clair & Emile Reynaud
La réouverture des salles de sciences, de technique et d'industrie permettra de découvrir par sa nouvelle présentation la collection Alexandre Clair et l'évocation d'Emile Reynaud, l'inventeur du praxinoscope et du théâtre optique (centenaire du cinéma oblige) ainsi que l'activité de l'industrie de la dentelle mécanique chez nous. La présentation d'une telle collection dont l'étude détaillée se poursuit rend tangible trois facettes des activités de ces constructeurs de modèles au

siècle dernier : la réalisation des inventions ; la transmission des savoirs techniques avec l'enseignement de la mécanique, la diffusion des savoir-faire et le développement de relations internationales.

5 MAI 17 SEPTEMBRE 1995

Expositions Café, cafés
Café, Cafés se veut être une exposition à la fois de grand prestige et scientifique. Elle est destinée à tous les publics. Grâce au Comité Français du Café et à l'Equipe du Musée Guimet d'Histoire Naturelle de Lyon vous découvrirez l'aventure passionnante d'une plante et d'une boisson, phénomène social et convivial avec au cours de la visite la dégustation de quelques crus sélectionnés par des

professionnels. Une exposition à déguster du 5 mai au 17 septembre pour le plaisir des petits et des grands.

DU 20 AU 28 MAI 95

Journées Portes Ouvertes
Pendant la Foire Exposition Velay-Auvergne, l'entrée au Musée Crozatier sera gratuite dans le cadre des Journées Portes Ouvertes sur la Foire Exposition.

6, 7 & 8 OCTOBRE 95

La Science en Fête
Le thème fédérateur régional sera : l'Alimentation.

OCTOBRE, DÉCEMBRE 95

1992 - 1995, **Trois ans d'acquisitions au Musée Crozatier.**

Au Musée Mandet à Riom

Du 21 février au 28 mai 95

AUTOCHROMES D'ETIENNE CLEMENTEL

Cette exposition rend hommage au talent de photographe d'Etienne Clémentel en présentant quelques uns de ses autochromes pris entre 1907 et 1930. Elle est une reprise de celle du Musée d'Orsay réalisée en 1993.

Etienne Clémentel (1864-1936)

Clermontois de naissance, Etienne Clémentel commença sa carrière politique en 1892 comme conseiller municipal de Riom dont il allait être maire en 1904 après avoir été, en 1900, député du Puy-de-Dôme.

En 1911 et 1920, il devient conseiller général puis sénateur du même département. En 1905, il est nommé ministre des colonies mais c'est surtout pendant et après la guerre, entre 1915 et 1920, lors de la reconstruction, qu'il joua un rôle politique de premier plan, dirigeant plusieurs ministères.

Le protecteur des arts

Dès sa jeunesse, Etienne Clémentel s'était senti attiré par les arts, un goût qui est d'ailleurs demeuré une tradition familiale. Seule la nécessité et son sens des responsabilités l'empêchèrent d'y consacrer sa vie. Il fut alors encouragé par Emmanuel des Essarts qui lui fit connaître l'œuvre de Michelet et de Mallarmé pour lequel il se prit de passion, comme pour Verlaine, Maeterlinck et les Rose-Croix. Par l'intermédiaire du peintre Franc-Lamy il connut les impressionnistes et notamment Auguste Renoir. Mais c'est surtout avec Claude Monet qu'il avait rencontré grâce à Clemenceau, un grand ami, qu'il noua des relations intimes. La correspondance que lui adressa le peintre entre 1917 et 1924 (conservée au Département des Arts Graphiques du Louvre) montre que Clémentel s'ingénia de toutes les ma-

nières à faciliter le travail et la vie du peintre, lui faisant livrer du charbon pour chauffer son vaste atelier, de l'huile-denrée rare à l'époque - pour sa peinture, s'arrangeant pour assurer le transport de ses toiles de grandes dimensions par chemins de fer, etc. Il ne fut pas moins proche de Rodin que lui avait présenté Léonce Bénédite, et son intervention fut déterminante dans la donation des œuvres du sculpteur à l'Etat en 1916.

A la même époque, Clémentel fut ami de Bourdelle ; par ailleurs, lui qui n'avait cessé de dessiner et de peindre pour son plaisir, exposa, en 1926, chez Bernheim-Jeune, 150 de ses œuvres, qui devaient être vendues au profit de l'Hôpital de Riom.

Le Maire de Riom

Elu maire de Riom le 11 mai 1904, Etienne Clémentel fit preuve d'un intérêt constant et soutenu pour le patrimoine artistique de sa cité.

Dès 1900, il se préoccupe avec beaucoup d'efficacité d'orner sa ville, pour laquelle il va entreprendre dans les années qui suivent de grands travaux d'urbanisme, en obtenant de l'Etat des dépôts d'œuvres et de monuments publics. La procédure du dépôt est fréquente à l'époque, mais toutes les cités n'en ont pas autant reçu.

Clémentel obtint également des peintures, notamment les panneaux décoratifs destinés à la salle des Mariages de l'Hôtel-de-Ville. Il complète de sa main ces œuvres par trois dessus de porte, très inspirés des peintures de son ami, Claude Monet.

C'est à l'occasion de ces travaux que Clémentel fit aménager le bureau du maire, orné de peintures révélatrices de ses goûts, particulièrement tourné vers les œuvres du XVIII^{ème} siècle.

Familier de Bourdelle, Clémentel est également très lié avec Rodin dont il deviendra l'exécuteur testamentaire. On doit à cette amitié l'installation dans la cour de l'Hôtel de Ville de la

"France", sculpture en bronze représentant le profil de Camille Claudel. Rodin réalisera également le portrait en buste d'Etienne Clémentel, dont deux exemplaires se trouvent à l'Hôtel de Ville et au Musée Mandet. Ce dernier s'enrichit également d'une "Jeune Mère" en bronze du sculpteur. Etienne Clémentel est encore à l'origine du transfert de la "Vierge à l'oiseau", à l'intérieur de l'église du Marthuret. Pour ce faire, il versa à titre personnel, la somme nécessaire à la fabrication d'un autel propre à recevoir la sculpture.

Les autochromes

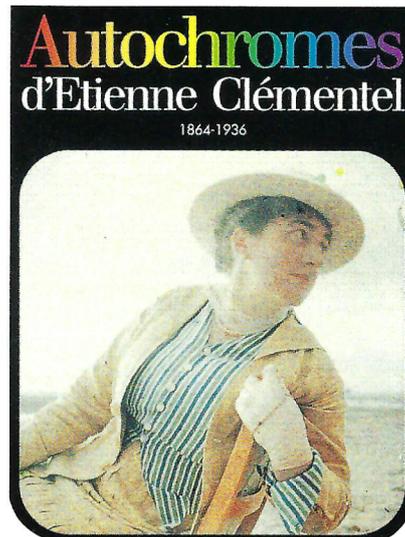
L'autochrome est le premier procédé commercialisé de photographie en couleurs mis au point par les frères Lumière, en 1904, et diffusé en 1907, à partir de l'invention de la trichromie par Louis Ducos du Hauron, en 1868. Pour cela, les frères Lumière avaient employé de très petits grains de fécule de pomme de terre teintés en violet, vert ou orangé - de façon à obtenir la couleur par synthèse additive - et répandus sur une plaque de verre recouverte d'un vernis dont les interstices étaient comblés par la poudre de charbon, cette couche étant ensuite laminée. On utilisait un filtre jaune spécial à la prise de vue et le traitement comportait une inversion du premier négatif obtenu. Clémentel utilisait des plaques stéréoscopiques de dimensions réduites (4,4 x 10,7 cm) prises avec un appareil vérascope Richard, permettant une vision en relief par transparence. Ses photographies sont ici présentées sous forme de tirages modernes agrandis, en cibachrome, réalisés par Patrice Schmidt.

L'artiste

La sensibilité artistique d'Etienne Clémentel est manifeste dans le traitement de ses autochromes et le distingué des milliers d'autres amateurs qui pratiquèrent cette technique au

cours de leurs loisirs. Bien évidemment, la familiarité de l'artiste avec la peinture impressionniste a inspiré la réalisation de ses prises de vue, comme ce fut le cas pour Antonin Personnaz, dont la collection de tableaux est conservée au Musée d'Orsay et qui fut un grand maître de l'autochrome. Chez Clémentel, les sujets sont, pour l'essentiel, des scènes familiales prises dans ses propriétés de Combronde et Prompsat, lors de ses villégiatures à Arcachon, au Grand Bé, pour honorer la tombe de Chateau-

briand, ou en Italie. On ne peut qu'être frappé par son sens du paysage, par l'harmonie pleine de vivacité de ses instantanés de plage, dont la composition tend vers l'abstraction et dont les rapports de couleurs se résolvent en un camaïeu délicat. Son goût du clair-obscur, habilement ménagé, dans maintes vues prises de l'intérieur, grâce au thème de la fenêtre, traditionnel en peinture, et dont il fait un motif de prédilection, est également remarquable.



Une nouvelle école d'ingénieurs à Clermont-Ferrand

Créée à l'initiative d'entreprises et grâce à la volonté conjointe du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, du Conseil Régional d'Auvergne, du Conseil Général du Puy-de-Dôme, de la ville de Clermont-Ferrand, rattaché administrativement à l'Université Blaise Pascal, l'ISIMA (Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs Applications) forme les ingénieurs en informatique dont la France et l'Europe ont besoin. Le recrutement se fait au niveau des concours des Grandes Ecoles.

L'ISIMA prépare à deux diplômes habilités par la Commission des Titres d'Ingénieurs :

- un Diplôme d'Ingénieur en Informatique et Modélisation, décerné au terme de trois années d'études, et structuré autour de quatre spécialités :
 - Architectures matérielles et conception de circuits
 - Systèmes informatiques et ingénierie du logiciel
 - Informatique de l'aide à la décision des systèmes d'information et des systèmes de production
 - Calcul et modélisation scientifiques
- un Diplôme de Spécialisation par la Recherche, délivré au terme d'une

quatrième année d'études dans l'Institut. L'ISIMA propose une pédagogie structurée en trois pôles :

- une formation générale : langues, connaissance des entreprises et des systèmes économiques, communication
- une formation scientifique de base : physique du solide et électronique, thermique et fluide, structure des matériaux...
- une formation technique et scientifique, où l'accent est mis sur :
 - la conception et l'utilisation des outils informatiques : circuits, génie logiciel, systèmes, réseau...
 - les outils et méthodes pour la modélisation : calcul scientifique, système d'information et bases de données, aide à la décision et recherche opérationnelle, simulation, automatismes spécialisés et robotique...
 - les applications : analyse et simulation des systèmes physiques et économiques, productique, logistique et

transport, gestion des systèmes organisationnels et productifs, conception et contrôle des systèmes automatisés, automatisation et pilotage des procédés de fabrication.

Les partenaires

Pour répondre aux défis de demain, l'ISIMA a été créé avec le concours actif d'entreprises comme Michelin, IBM, Limagrain, ECCO, DEC, la Banque Populaire, la Banque Nuger. Sa mise en place a été possible grâce à la détermination et au financement du Conseil Régional d'Auvergne, du Conseil Général du Puy-de-Dôme et de la Ville de Clermont-Ferrand.

Contacts entreprises

ISIMA : Complexe des Cézeaux - B.P. 125 - 63173 Aubière Cedex
Tél. 73 40 50 00 - Fax 73 40 50 01 - Minitel : 3615 code ISIMA

ADERI : 30, rue Sainte-Rose - 63000 Clermont-Ferrand
Tél. 73 37 37 38 - Fax 73 36 82 37



**Lyonnaise
de Banque**

Agence CLERMONT JAUDE
38, place de Jaude
63000 CLERMONT-FERRAND
Tél. : 73 34 47 47