



C O L L E C T I O N
DIRIGÉE PAR JEAN BORNAREL

G R E N O B L E

S C I E N C E S

RENCONTRE DE LA SCIENCE ET DE L'ART

L'ARCHITECTURE MOLÉCULAIRE DU VIVANT

■ Jeannine YON-KAHN



Extrait de la publication

EDP
SCIENCES

RENCONTRE DE LA SCIENCE ET DE L'ART
L'ARCHITECTURE MOLÉCULAIRE DU VIVANT

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences poursuit un triple objectif :

- ▶ réaliser des ouvrages correspondant à un projet clairement défini, sans contrainte de mode ou de programme,
- ▶ garantir les qualités scientifique et pédagogique des ouvrages retenus,
- ▶ proposer des ouvrages à un prix accessible au public le plus large possible.

Chaque projet est sélectionné au niveau de Grenoble Sciences avec le concours de referees anonymes. Puis les auteurs travaillent pendant une année (en moyenne) avec les membres d'un comité de lecture interactif, dont les noms apparaissent au début de l'ouvrage. Celui-ci est ensuite publié chez l'éditeur le plus adapté.

(Contact : Tél. : (33)4 76 51 46 95 - E-mail : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr)

Deux collections existent chez EDP Sciences :

- ▶ la *Collection Grenoble Sciences*, connue pour son originalité de projets et sa qualité
- ▶ *Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques*, collection présentant des thèmes de recherche d'actualité, traités par des scientifiques de premier plan issus de disciplines différentes.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

Comité de lecture pour *Rencontre de la science et de l'art*

- ▶ Philippe HUNEMAN, Chargé de recherche au CNRS, IHPST, Paris
- ▶ Régis MACHE, Professeur émérite à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
- ▶ Eva PEBAY-PEYROULA, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, membre de l'Académie des sciences
- ▶ Jean PELMONT, Professeur émérite à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
- ▶ Jacques RICARD, Professeur émérite à l'Université Paris VII, membre de l'Académie des sciences
- ▶ Michel VAN DER REST, Directeur de recherche au CNRS, Directeur général du Synchrotron SOLEIL, Gif Sur Yvette

Grenoble Sciences bénéficie du soutien du

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et de la Région Rhône-Alpes.

Grenoble Sciences est rattaché à l'**Université Joseph Fourier de Grenoble.**

Réalisation et mise en pages : **Centre technique Grenoble Sciences**

Illustration de couverture : **Alice GIRAUD**

(d'après : Jubé de Saint Etienne du Mont, Photo Marie-Lan NGUYEN / Wikimedia commons, 2006 ; Thangka mandala tibétain des six Chakravartins [anonyme XIX^e siècle] ; [PDB ID : 2c4l] RUDINO-PINERA E., CRENNELL S.J., WEBSTER R.G., LAVER W.G. & GARMAN E.F., The Crystal Structure of Influenza Type A Virus Neuraminidase of the N6 Subtype at 1.85 Å Resolution ; [PDB ID : 9ilb] Molécule d'Interleukine construite avec le logiciel Swiss PDB viewer)

ISBN 978-2-7598-0486-3

© EDP Sciences, 2010

**RENCONTRE DE LA SCIENCE
ET DE L'ART**

**L'ARCHITECTURE MOLÉCULAIRE
DU VIVANT**

Jeannine YON-KAHN



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - France

Ouvrages Grenoble Sciences édités par EDP Sciences

Collection Grenoble Sciences

Chimie. Le minimum à savoir (*J. Le Coarer*) • Electrochimie des solides (*C. Déportes et al.*) • Thermodynamique chimique (*M. Oturan & M. Robert*) • CD de Thermodynamique chimique (*J.P. Damon & M. Vincens*) • Chimie organométallique (*D. Astruc*) • De l'atome à la réaction chimique (*sous la direction de R. Barlet*) • Spectroscopies infrarouge et Raman (*R. Poilblanc & F. Crasnier*) • Chemogénomique. Des petites molécules pour explorer le vivant (*sous la direction de E. Maréchal, S. Roy & L. Lafanchère*) • L'électrochimie. Fondamentaux avec exercices corrigés (*C. Lefrou, P. Fabry & J.C. Poignet*)

Introduction à la mécanique statistique (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • Mécanique statistique. Exercices et problèmes corrigés (*E. Belorizky & W. Gorecki*) • La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels (*J.P. Franc et al.*) • La turbulence (*M. Lesieur*) • Magnétisme : I Fondements, II Matériaux et applications (*sous la direction d'E. du Trémolet de Lacheisserie*) • Du Soleil à la Terre. Aéronomie et météorologie de l'espace (*J. Liliensten & P.L. Blelly*) • Sous les feux du Soleil. Vers une météorologie de l'espace (*J. Liliensten & J. Bornarel*) • Mécanique. De la formulation lagrangienne au chaos hamiltonien (*C. Gignoux & B. Silvestre Brac*) • Problèmes corrigés de mécanique et résumés de cours. De Lagrange à Hamilton (*C. Gignoux & B. Silvestre-Brac*) • La mécanique quantique. Problèmes résolus, T. 1 et 2 (*V.M. Galitsky, B.M. Karnakov & V.I. Kogan*) • Description de la symétrie. Des groupes de symétrie aux structures fractales (*J. Sivardière*) • Symétrie et propriétés physiques. Du principe de Curie aux brisures de symétrie (*J. Sivardière*) • Physique des plasmas collisionnels. Application aux décharges haute fréquence (*M. Moisan & J. Pelletier*) • Energie et environnement. Les risques et les enjeux d'une crise annoncée (*B. Durand*) • Hydrothermalisme. Spéciation métallique hydrique et systèmes hydrothermaux (*M. Chenevoy & M. Piboule*) • Les roches, mémoire du temps (*G. Mascle*)

Exercices corrigés d'analyse, T. 1 et 2 (*D. Alibert*) • Introduction aux variétés différentielles (*J. Lafontaine*) • Mathématiques pour les sciences de la vie, de la nature et de la santé (*F. & J.P. Bertrandias*) • Approximation hilbertienne. Splines, ondelettes, fractales (*M. Attéia & J. Gaches*) • Mathématiques pour l'étudiant scientifique, T. 1 et 2 (*Ph.J. Haug*) • Analyse statistique des données expérimentales (*K. Protassov*) • Nombres et algèbre (*J.Y. Mérindol*) • Analyse numérique et équations différentielles (*J.P. Demailly*) • Outils mathématiques à l'usage des scientifiques et ingénieurs (*E. Belorizky*) • Méthodes numériques appliquées pour le scientifique et l'ingénieur (*J.P. Grivet*)

Bactéries et environnement. Adaptations physiologiques (*J. Pelmont*) • Enzymes. Catalyseurs du monde vivant (*J. Pelmont*) • Endocrinologie et communications cellulaires (*S. Idelman & J. Verdeti*) • Eléments de biologie à l'usage d'autres disciplines (*P. Tracqui & J. Demongeot*) • Bioénergétique (*B. Guérin*) • Cinétique enzymatique (*A. Cornish-Bowden, M. Jamin & V. Saks*) • Biodégradations et métabolismes. Les bactéries pour les technologies de l'environnement (*J. Pelmont*) • Enzymologie moléculaire et cellulaire, T. 1 et 2 (*J. Yon-Kahn & G. Hervé*) • Glossaire de biochimie environnementale (*J. Pelmont*) • Abrégé de biochimie appliquée (*A. Marouf & G. Tremblin*)

L'Asie, source de sciences et de techniques (*M. Soutif*) • La biologie, des origines à nos jours (*P. Vignais*) • Naissance de la physique. De la Sicile à la Chine (*M. Soutif*) • Science expérimentale et connaissance du vivant. La méthode et les concepts (*P. Vignais, avec la collaboration de P. Vignais*) • Histoire de la science des protéines (*J. Yon-Kahn*)

La plongée sous-marine à l'air. L'adaptation de l'organisme et ses limites (*Ph. Foster*) • Le régime oméga 3. Le programme alimentaire pour sauver notre santé (*A. Simopoulos, J. Robinson, M. de Lorgeril & P. Salen*) • Gestes et mouvements justes. Guide de l'ergomotricité pour tous (*M. Gendrier*)

Listening Comprehension for Scientific English (*J. Upjohn*) • Speaking Skills in Scientific English (*J. Upjohn, M.H. Fries & D. Amadis*) • Minimum Competence in Scientific English (*S. Blattes, V. Jans & J. Upjohn*) • Minimum Competence in Medical English (*J. Upjohn, J. Hay, P.E. Colle, J. Hibbert & A. Depierre*)

Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques

Radiopharmaceutiques. Chimie des radio-traceurs et applications biologiques (*sous la direction de M. Comet & M. Vidal*) • Turbulence et déterminisme (*sous la direction de M. Lesieur*) • Méthodes et techniques de la chimie organique (*sous la direction de D. Astruc*) • L'énergie de demain. Techniques, environnement, économie (*sous la direction de J.L. Bobin, E. Huffer & H. Nifenecker*) • Physique et biologie. Une interdisciplinarité complexe (*sous la direction de B. Jacrot*)

Le savant n'étudie pas la nature parce que cela est utile; il l'étudie parce qu'elle est belle. Si la nature n'était pas belle, elle ne vaudrait pas la peine d'être connue, la vie ne vaudrait pas la peine d'être vécue.

Henri POINCARÉ
(*Science et Méthode*)

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v' d i e p m

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	1
1 - LES FORMES DU VIVANT ET L'ESTHÉTIQUE ARCHITECTURALE	5
2 - L'ÉMERGENCE DE LA BIOLOGIE STRUCTURALE	17
Les protéines	20
Les acides nucléiques	28
3 - LA DOUBLE HÉLICE, STRUCTURE OU SYMBOLE ?	39
4 - L'ÉTONNANTE HARMONIE DES STRUCTURES PROTÉIQUES	53
Les motifs architecturaux des protéines	55
Les formes architecturales	65
> Occurrence de l'hélice dans les œuvres de l'art	65
> Occurrence du méandre β dans les œuvres de l'art	72
> Occurrence du trèfle dans les œuvres de l'art	76
> Occurrence du motif grec dans les œuvres de l'art	78
Les protéines oligomériques	79
5 - LES ÉDIFICES SUPRAMOLÉCULAIRES	85
Les systèmes multienzymatiques et les assemblages de protéines	85
Les virus	89
> Les virus à symétrie hélicoïdale	89
> Les virus à symétrie cubique	91
6 - LES PRINCIPES PHYSIQUES À L'ORIGINE DE L'ESTHÉTIQUE STRUCTURALE	99
Formation des architectures moléculaires	100
Nature des forces impliquées dans la stabilité des protéines	105
Flexibilité, fluctuations conformationnelles et stabilité	110
7 - BEAUTÉ ET VÉRITÉ EN SCIENCE	115
BIBLIOGRAPHIE	125
INDEX DES NOMS PROPRES	135

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'ighv'dnc pm

AVANT-PROPOS

Depuis les temps les plus anciens, l'homme a interrogé le monde. Ce questionnement est à la base de toute démarche intellectuelle, qu'elle soit de nature scientifique, philosophique ou religieuse. Si ces différents champs de réflexion se sont progressivement éloignés les uns des autres au cours de l'histoire, avec la fragmentation du savoir et la divergence des disciplines et sous-disciplines, il n'en est pas moins vrai que les sciences font partie de notre culture anthropologique. Les formidables avancées de la science au xx^e siècle ont transformé le rapport entre la science et la société. Par ses applications la science est devenue un élément essentiel de notre existence. Non seulement elle est entrée dans notre quotidien, mais, de plus en plus, elle représente un enjeu économique important et elle exerce une réelle influence sur la politique des Etats.

Parmi l'ensemble des sciences, la biologie occupe une position centrale. Elle concerne tous les humains, cherchant à répondre à l'éternelle question : qui sommes-nous ? Progressivement, l'homme a pris une place de plus en plus importante dans le monde. Bien que le cosmos suscite encore un intérêt certain, dans les divers domaines de la pensée les préoccupations sont devenues de plus en plus anthropocentristes depuis DESCARTES et son *cogito ergo sum*. Ainsi que le souligne Paul VALÉRY : *Cogito me fait l'effet d'un appel sonné par DESCARTES à ses puissances égotistes*^[1]. L'injonction de l'oracle de Delphes, *connais-toi toi-même*, avait un tout autre sens. Comme le disait SOCRATE, se connaître soi-même, c'est connaître l'infini et les dieux. La tradition hindoue comporte la même ouverture sur le monde. *Je ne me connais moi-même qu'en tant que je connais les dieux, et je ne connais les dieux qu'en tant que je me connais moi-même*, enseignait Mahidasa AITAREYA^[2]. A l'inverse, l'homme moderne s'est replié sur lui-même dans un processus d'enfermement. *On pourrait même soutenir que le caractère principal de la Modernité, par lequel elle se distingue radicalement de l'Antiquité, tient à ce passage insensible de la substantialité à la subjectivité [...] L'homme antique fondait la hauteur de son âme sur le monde, ou chez PLATON, cet au-delà du monde qu'est le bien, l'homme moderne fonde uniquement son moi sur lui-même*^[3]. Tel NARCISSE contemplant son reflet dans les eaux de la fontaine, l'homme moderne contemple sa propre image. Son regard s'est détourné du monde, pour se retourner sur lui-même. Dans ce retour sur lui-même, il devient de plus en plus attentif à sa santé et, en conséquence, aux développements de

[1] P. VALÉRY (1957) *Œuvres complètes tome I*, 860, Gallimard (La Pléiade), Paris

[2] *Aitareya-Aranyaka II*(1), 8, cité par J.F. MATTÉI (1999) *La barbarie intérieure*, PUF, Paris

[3] J.F. MATTÉI, *op. cit.*

la biologie. A travers la médiatisation qui caractérise notre époque, l'intérêt pour la biologie s'ouvre aujourd'hui à un large public. Cette science interpelle par les problèmes de société et d'éthique qu'elle pose en raison des progrès de la génétique, par les problèmes de santé humaine et leur dimension planétaire. Devant les potentialités offertes, souvent imparfaitement relayées par les médias, la biologie, plus encore que les autres sciences, suscite des réflexes de crainte et même de rejet. Certes, la science a amélioré la qualité de la vie, tout au moins dans les pays développés, mais elle a aussi donné naissance à des dangers qui menacent l'existence de l'espèce humaine. Les organismes transgéniques, les manipulations du vivant, la menace des équilibres de la biosphère éveillent des angoisses concernant la survie de l'homme. La science ne se contente plus de découvrir le monde, elle le transforme. Ne voit-on pas se profiler l'arrivée du *meilleur des mondes* ? Beaucoup de ces craintes résultent, il est vrai, d'une méconnaissance, reposent sur une information superficielle et subjective, le plus souvent utilisée par des groupes de pression. Il n'en est pas moins vrai que les succès des sciences biologiques posent de plus en plus de problèmes d'éthique et engagent sérieusement la responsabilité des scientifiques et des décideurs.

Les développements technologiques en progression continue et rapide qui ont marqué la fin du xx^e siècle sont parvenus à un tel point de succès que la science est souvent assimilée à la technique. Ainsi Kostas AXELOS peut-il écrire dans *Métamorphoses : L'imbrication de la technique et de la science a atteint un tel point que nous ne pouvons parler que de la technique scientifique, de la science technicisée, bref de la techno-science*. Et, affirme-t-il encore : *L'entreprise de la technique planétaire vise à s'accaparer le monde lui-même qui demeure invisible et cesse généralement de faire question. C'est lui pourtant qui nous questionne, nous met en question*^[4]. Combien il me semble regrettable que la science apparaisse ainsi assimilée à la technique, confondue avec la technique, aux yeux de philosophes avisés. Certes, des progrès techniques impressionnants ont été réalisés au cours de ce siècle. Mais la technique n'est et ne doit être qu'un moyen permettant d'appréhender des dimensions jusqu'alors inaccessibles depuis l'infiniment petit jusqu'à l'infiniment grand, de l'échelle atomique à l'échelle de l'Univers.

C'est un tout autre aspect de la science que je tiens à faire apparaître, me situant à l'intersection entre la science et l'art. Comment ne pas poser un regard émerveillé sur ces mondes qui nous sont révélés par des techniques de plus en plus élaborées ? A partir de la seconde moitié du xx^e siècle, l'introduction de l'informatique a entraîné une accélération considérable dans la progression des sciences. Associé au développement des équipements lourds de la physique, cet événement a fait reculer les limites du savoir vers l'infiniment petit comme vers l'infiniment grand. Aujourd'hui nous avons accès à la connaissance de plusieurs milliers de structures moléculaires et supramoléculaires résolues à l'échelle atomique. L'accès de la représentation des molécules du vivant à la troisième dimension révèle une étonnante complexité

[4] K. AXELOS (1991) *Métamorphoses*, Ed. de Minuit, Paris

d'organisation à partir d'éléments simples dont la combinatoire a été sans cesse perfectionnée au cours de l'évolution. *L'harmonie invisible surpasse l'harmonie visible*, écrivait HÉRACLITE. L'organisation structurale des macromolécules biologiques est fascinante. Elle fait apparaître des invariants structuraux, des motifs topologiques dont certains présentent une étrange similitude avec les formes architecturales créées par l'homme depuis les temps les plus reculés. Même l'art moderne semble avoir devancé la découverte de motifs naturels. Sommes-nous en présence de formes archétypiques ? L'homme aurait-il eu présents dans son esprit les éléments structuraux contenus dans la nature ? L'art aurait-il anticipé les formes naturelles révélées par les technologies modernes ? Les signes du monde furent-ils présents dans l'inconscient humain avant que la science ne les déchiffre ? Les découvertes modernes révèlent-elles des symboles mythiques cachés dans le monde microscopique, ou bien les lois de l'harmonie ont-elles tout simplement un caractère universel ? Autant de questions que l'on peut se poser. Comme le souligne D'ARCY THOMPSON, les formes ne sont pas spécifiques du vivant, mais sont des manifestations plus ou moins simples des lois physiques ordinaires : *We begin by an easy and general assumption of specific properties, by which each organism assumes its own specific form; we learn later (as it is the purpose of this book to show) that throughout the whole range of organic morphology there are innumerable phenomena of form which are not peculiar to living things, but which are more or less manifestations of ordinary physical laws* [5].

L'aphorisme de PLATON selon lequel *le Livre de la Nature est écrit en caractères de Géométrie* traduit une conception déjà présente chez PYTHAGORE et peut-être chez les Egyptiens, et plus tard reprise par GALILÉE. Sur cette vision du monde reposent les lois de l'harmonie utilisées dans les œuvres artistiques humaines. Comme l'écrit Georges CANGUILHEM : *La fascination de l'esprit humain pour la troisième dimension trouve son expression dans tous les domaines de l'activité intellectuelle. Elle est à l'origine de l'architecture et de la sculpture* [6]. Bien au-delà des techniques qui ont permis de les dévoiler, les structures des molécules du vivant nous surprennent par leur étonnante beauté, par l'harmonie de leurs formes qui évoquent des formes du monde macroscopique.

L'esthétique est un facteur essentiel dans le processus scientifique. Cet aspect me semble méconnu de ceux qui ne sont pas directement impliqués dans l'aventure de la science. Il n'est nullement révélé au-delà d'un cercle restreint. La diffusion des découvertes scientifiques par les médias souligne leur portée socio-économique, mais ne permet pas de soupçonner la beauté de ces mondes invisibles. C'est pourquoi, il m'a semblé important d'insister sur les règles d'harmonie qui accompagnent la structuration des molécules du vivant. Comme l'écrivait POINCARÉ : *Ce n'est que*

[5] *Nous commençons par une hypothèse facile et générale des propriétés spécifiques par lesquelles chaque organisme revêt sa propre forme. Nous apprenons plus tard (c'est ce que ce livre veut montrer) qu'à travers l'entière variété de la morphologie organique, il y a d'innombrables phénomènes de forme qui ne sont pas particuliers aux êtres vivants, mais qui sont plus ou moins des manifestations des lois physiques ordinaires*, W. D'ARCY THOMPSON (1917) *On growth and form*, reprinted 1997, Cambridge University Press, Cambridge

[6] G. CANGUILHEM (1980) *La connaissance de la vie*, J. Vrin, Paris

par la Science et par l'Art que valent les civilisations^[7]. Mais ces deux domaines sont-ils si différents ? N'est-ce pas une même pulsion créatrice qui anime le scientifique et l'artiste ? *Les phénomènes artistiques, comme les êtres vivants, nous mettent en présence de processus de génération de formes qui semblent, à maints égards, ne pas être réductibles à la pure nécessité, ni au hasard*^[8]. Ces formes sont-elles inscrites au plus profond de l'esprit humain ? *L'esprit travaille inconsciemment dans une direction comparable à celle de la nature*^[9].

Le but de cet ouvrage est de faire partager le plus largement possible l'admiration que suscite la beauté des structures moléculaires et des édifices supramoléculaires qui constituent les êtres vivants et leur assurent un fonctionnement harmonieux. Son titre aurait pu être *L'Esthétique du vivant*. Cependant un tel titre eût été trop général et non-dénué d'ambiguïté. En effet, je me suis limitée au domaine moléculaire, à l'invisible que les moyens actuels permettent de visualiser. Dans ce livre, il n'est question que des structures des macromolécules biologiques et de leurs assemblages, ainsi que des règles topologiques qui président à leur organisation de laquelle émerge une incroyable beauté. Le choix des molécules biologiques, qui a privilégié les protéines et l'acide désoxyribonucléique, l'ADN, n'est pas fortuit ; il résulte des caractéristiques structurales bien définies de ces molécules. J'ai tenté de montrer la correspondance entre les structures moléculaires du vivant et les formes rencontrées dans l'art depuis les temps les plus anciens, avec parfois leur signification symbolique. Dans le domaine biologique, comme dans d'autres domaines de la science : *The teleology of the Universe is directed to the production of Beauty*^[10].

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier Juliette BERNET et Jean Baptiste BERNET (architecte) pour les nombreux documents qu'ils lui ont fournis pour la préparation de cet ouvrage. Mes remerciements vont aussi à Guy HERVÉ et Jean DURUP pour avoir relu attentivement le manuscrit.

Je tiens à remercier très chaleureusement Jean BORNAREL pour l'intérêt qu'il a porté à mon manuscrit et pour son aide et ses conseils. J'ai beaucoup apprécié la très grande compétence et l'efficacité de Laura CAPOLO ; sa collaboration m'a été très précieuse. Je suis très reconnaissante à Sylvie BORDAGE d'avoir remarquablement géré la mise en forme de l'ouvrage et la présentation des illustrations.

[7] H. POINCARÉ (1917) *La valeur de la science*, Flammarion, Paris

[8] J.J. WUNENBURGER (1992) «Principes et enjeux d'une morpho-esthétique» *Les figures de la forme*, J. GAYON & J.J. WUNENBURGER Eds, L'Harmattan, Paris

[9] C. LÉVI-STRAUSS (1973) *Style et transformation*, Plon, Paris

[10] *La téléologie de l'Univers est dirigée vers la production de Beauté*, A.N. WHITEHEAD (1933) *Adventures of ideas*, The Macmillan C°, New-York

1 - LES FORMES DU VIVANT ET L'ESTHÉTIQUE ARCHITECTURALE

Dans les formes du vivant que nous révèle la science, ainsi que dans l'art, on retrouve une hiérarchie structurale avec une alternance de parties internes et de parties externes, de régularités et d'irrégularités. Ni les atomes, ni les lignes ne sont suffisants en eux-mêmes ; c'est l'assemblage soit de la matière, soit de la perception qui fait les objets scientifiques et artistiques. Les principes d'assemblage sont basés sur la sélection, la répétition, l'ajustement. Ils doivent respecter les règles de l'harmonie et la stabilité des formes ainsi conçues. *Ce qu'il y a de commun à la pratique de la science et au cheminement créateur de l'artiste s'enracine dans la faculté imageante (la capacité de construire des schèmes mentaux, le talent de modéliser) et le dynamisme de l'image, sa densité matérielle couplée à son amplitude psychique*^[1].

L'analogie entre les formes du vivant à l'échelle macroscopique, dans le domaine du visible, et les formes architecturales est apparue depuis les temps les plus anciens. Les règles d'harmonie qui ont présidé à la conception des temples grecs, du Parthénon et des pyramides ont été retrouvées dans les proportions du corps humain, dans diverses espèces animales et dans des formes végétales. LÉONARD DE VINCI pensait que la loi du nombre est inscrite dans la nature comme dans l'art. Les principes géométriques inscrits dans les formes du vivant et utilisées en architecture ont donné lieu à plusieurs analyses, parmi lesquelles celles de D'ARCY THOMPSON^[2], de Malica GHYKA^[3] et de Sir Theodore COOK^[4].

Il existe deux formes de pensée scientifique, l'une est descriptive, c'est la pensée d'ARISTOTE, l'autre est structurale, c'est la pensée de PLATON. Le *Timée* est construit sur l'hypothèse des formes idéales et privilégie le concept de forme, alors que pour ARISTOTE coexistent la matière et la forme. Pour PLATON, *le Démonstrateur et ses agents mettent au jour des formes nouvelles, mais ces formes sont obtenues par la combinaison harmonieuse d'éléments préexistants*^[5]. A partir de triangles, PLATON construit les solides élémentaires : le tétraèdre qui est la figure élémentaire du feu, l'octaèdre celle de l'air, l'icosaèdre celle de l'eau et le cube celle de la terre. Le Démonstrateur a

[1] P. TACUSSEL (1992) «Imaginaire et esthétique sociale : proximité épistémologique» *Les figures de la forme, op. cit.*

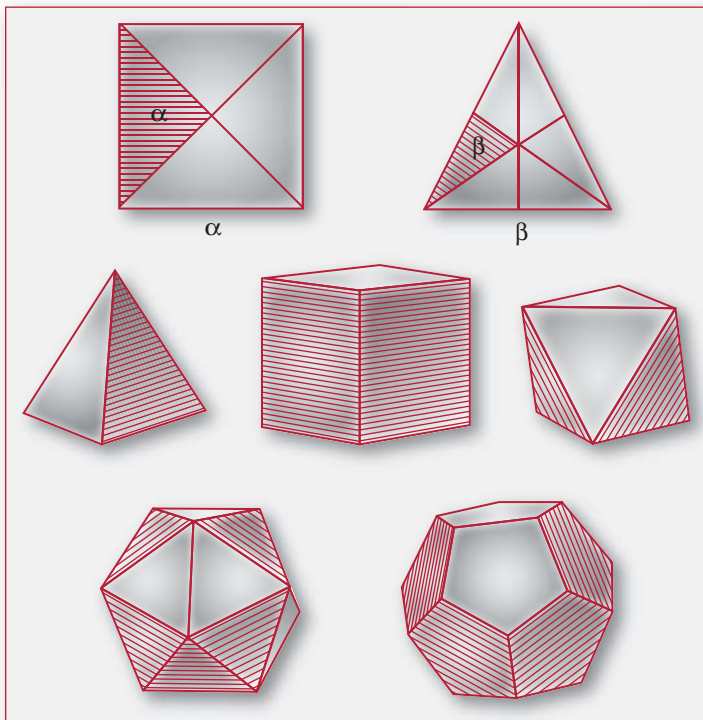
[2] W. D'ARCY THOMPSON (1917) *op. cit.*

[3] M. GHYKA (1927) *Esthétique des proportions dans la Nature et dans les Arts*, Gallimard, Paris

[4] T.A. COOK (1914) *The curves of Life*, Constable & C°, London, cité par M. GHYKA (1927) *op. cit.*

[5] PLATON, *Timée*, 53-56

harmonisé mathématiquement les éléments^[5]. Il se sert du dodécaèdre, symbole de l'harmonie universelle, pour composer l'arrangement final du tout. Mais la figure la plus parfaite reste la sphère. Pour PLATON, l'Univers est sphérique. *C'est pourquoi le Démonstrateur a tourné le Monde en forme sphérique et circulaire, les distances étant partout égales depuis le centre jusqu'aux extrémités. C'est là de toutes les figures, la plus parfaite et la plus complètement semblable à elle-même*^[6]. Le monde sensible est la copie d'un modèle. *Toutes les fois donc que l'ouvrier, les yeux sans cesse fixés sur ce qui est identique, se sert d'un tel modèle, toutes les fois qu'il s'efforce d'en réaliser dans son œuvre la forme et les propriétés, tout ce qu'il produit est nécessairement beau*^[7]. Les solides de PLATON sont illustrés par la **figure 1**.



1

Les deux triangles et les cinq polyèdres de PLATON

Le tétraèdre formé de quatre triangles équilatéraux,
 le cube formé de six carrés,
 l'octaèdre formé de huit triangles équilatéraux,
 l'icosaèdre formé de vingt triangles équilatéraux
 et le dodécaèdre formé de douze pentagones réguliers.

[6] PLATON, *Timée*, 33 b

[7] PLATON, *Timée*, 28 a, 28 b

Les quatre solides réguliers sont des figures dont tous les angles et tous les côtés sont égaux. Leur origine est pythagoricienne, mais c'est PLATON qui les a identifiés aux quatre éléments d'EMPÉDOCLE^[8].

Pour les Grecs, la beauté du monde réside dans le sentiment d'harmonie que procure la juste proportion. PYTHAGORE considère que *tout est formé conformément au nombre, puisque dans le nombre réside l'ordre essentiel*. Chez PYTHAGORE, le monde est fait d'un mélange de formes distribuées selon des intervalles mathématiques sur les deux révolutions de l'univers. La tetraktys pythagoricienne est constituée de la suite des quatre premiers nombres (1 + 2 + 3 + 4) dont la somme est égale à 10. Une double progression géométrique, de raison 2 (1, 2, 2², 2³...) et de raison 3 (1, 3, 3², 3³...), croisée et divisée en sept parties, correspond à la formation harmonique des sept notes de la gamme de PYTHAGORE et à la mesure astronomique du cercle de l'équateur et de l'écliptique sur lequel sont disposés les étoiles et les sept corps célestes du système solaire connus des Grecs (soleil, lune et cinq planètes tournant autour de la terre)^[9]. L'*Epinomis* de PLATON est un hymne à la science du nombre^[10].

Si chez ARISTOTE l'étude de la forme est essentielle au physicien, c'est surtout comme moteur et comme fin. L'objet de la physique est à la fois matière et forme. La forme pure est renvoyée au métaphysicien car la forme, *morphè*, est une réalité ontologique allant bien au-delà de ce que nous livre la perception d'un objet^[11]. Dans la tradition aristotélicienne, les formes constituent le déterminant essentiel du monde matériel qui n'est intelligible que grâce aux formes qui sont imprimées sur la matière. Toute une symbolique s'est attachée à ces formes. Le pentagone étoilé, ou pentagramme, était l'emblème de la santé et de la vie chez les pythagoriciens. Il figure dans les armes du Maroc. Son dernier avatar fut l'étoile rouge des soviets. Le nombre 5 était le nombre d'APHRODITE. Le triangle maçonnique est équilatéral, la pointe orientée vers le haut. Le pentagramme maçonnique est une étoile dont les cinq branches sont des triangles isocèles autour d'un centre pentagonal tel qu'il est représenté sur la *figure 2*. Il représente l'étoile flamboyante des compagnons francs-maçons symbolisant la lumière et la connaissance. Le triangle équilatéral est un symbole judaïque, deux triangles équilatéraux forment l'étoile de DAVID qui figure sur le drapeau de l'Etat d'Israël. Ces figures géométriques simples ont un contenu symbolique qui a marqué différentes civilisations du globe.

Formes artistiques et formes naturelles prennent naissance à partir d'un même langage (de polyèdres, de mosaïques, de spirales, de méandres et de branchement) moins par un mimétisme conscient, que par suite d'une détermination unique de toutes les formes, qu'elles soient explicitées par la nature ou par l'esprit^[12].

[8] J. BOLLACK (1965) *Empédocle*, Ed. de Minuit, Paris

[9] J.F. MATTÉI (1999) *op. cit.*

[10] PLATON, *Epinomis*, 976-977

[11] ARISTOTE, *Physique*, 192 b

[12] J.J. WUNENBURGER (1992) *op. cit.*

L'importance du nombre réapparut dès le début du xv^e siècle avec Nicolas DE CUES qui, bien que n'étant pas mathématicien, en reconnut la valeur : *Supprimez le nombre, cessent aussitôt la distinction des choses, l'ordre, la proportion, l'harmonie et jusqu'à la pluralité des êtres*^[13]. Pour LEIBNIZ, *le nombre qui constitue l'essence des choses, ne doit pas être conçu comme un simple numéro d'ordre dans une série ordinale, mais comme une structure cardinale*^[14]. Le monde est formé de monades ou substances simples, qui s'organisent en systèmes, les formes substantielles étant indestructibles. LEIBNIZ développe une combinatoire telle qu'il s'agit d'obtenir le plus d'êtres possibles avec le minimum de dépense ; c'est à quoi doit aboutir le calcul combinatoire. Si avec ARISTOTE, il distingue la matière et la forme, il considère que *c'est la forme qui donne l'être déterminé à la matière*^[15].

Les gestaltistes ont privilégié les notions de forme et de structure dans l'interprétation du monde physique, biologique et mental et rejeté le dualisme aristotélicien de la matière et de la forme. La Gestalttheorie part de formes ou de structures considérées comme des données premières. Elle considère qu'il n'y a pas de matière sans forme. Les formes privilégiées sont régulières, simples, symétriques. La loi de la forme tend à la réalisation d'une structure aussi simple et aussi régulière que possible. Cette théorie porte aussi une attention particulière à l'organisation. Il existe une harmonie naturelle entre la raison et l'univers parce qu'ils obéissent aux mêmes lois d'organisation. Les Gestaltistes ont insisté sur la tendance des perceptions à la simplicité. La forme qui est perçue est la meilleure possible. L'ordre qui s'exprime dans les lois physiques ressemble à celui qui se traduit dans notre intelligence. La théorie de la forme distingue des degrés dans la cohésion interne des formes^[16].

La notion de forme est engendrée par les perceptions sensorielles. CONDILLAC construisait l'âme de sa statue à travers les sensations. Son système repose sur le principe que toutes nos connaissances nous viennent des sens et que les idées sont acquises à partir des sensations. *Toute connaissance vient des sens*^[17]. Le signe est le symbole substitué aux perceptions et le pouvoir du signe sur l'idée engendre tout l'entendement. *Nous n'avons point d'idées qui ne nous viennent des sens*^[18].

Le contenu propre de la sensation se retrouve dans un deuxième élément, l'image, qui en est la reproduction. Pour PLATON la vue est essentielle au processus de la connaissance. *De fait, la vue selon mon raisonnement a été créée pour être à notre profit, ce principe de plus grande utilité, car de tous les discours que l'on peut faire sur le Monde, nul n'aurait pu être tenu si les hommes n'avaient jamais pu voir, ni les astres, ni le soleil, ni le ciel*^[19].

[13] N. DE CUES (1440) *La docte ignorance I*, 5^e éd. 1964, Seghers, Paris

[14] Y. BELLAVAL (1952) *Pour comprendre la pensée de LEIBNIZ*, Bordas, Paris

[15] G.W. LEIBNIZ, Lettre à ARNAULD, 9 oct. 1687

[16] P. GUILLAUME (1979) *La psychologie de la forme*, Flammarion, Paris

[17] E. BONNOT DE CONDILLAC (1749) *Traité des Systèmes*, rééd. 1966, Seghers, Paris

[18] E. BONNOT DE CONDILLAC (1746) *Essais*, rééd. 1966, Seghers, Paris

[19] PLATON, *Timée*, 47 a

L'importance de la sensorialité dans le processus de la pensée apparaît au XV^e siècle avec Nicolas DE CUES. Ainsi, écrivait LE CUSAIN, *il en est de même de la force de la pensée, force intellectuelle et notionnelle, laquelle ne saurait opérer qu'excitée par des données sensibles, ce qui ne se produit pas sans l'entremise des images de la sensibilité*^[20]. NIETZSCHE a été conduit à considérer que *toute connaissance est une description métaphorique de l'Univers dont la figuration est l'instrument privilégié*^[21].

La perception sensorielle joue un rôle essentiel dans la connaissance scientifique. *Nous pouvons dire que la perception est en partie la cause de toute connaissance humaine concrète*^[22]. Des développements élaborés à partir de concepts purement abstraits ont mis beaucoup de temps à faire leur chemin dans la communauté scientifique. Certains résultats ne sont devenus consensuels que lorsqu'ils ont pu être visualisés. Comme l'écrivait Nils BOHR, *la perception sensorielle est la base de la vérification*. Elle est aussi à la base de notre appréciation de l'esthétique dans les œuvres de l'art comme dans celles de la nature. A cet égard, l'avènement de l'informatique a créé une véritable révolution dans la connaissance de la nature. Les méthodes de visualisation disponibles aujourd'hui sur les écrans d'ordinateurs nous donnent accès à l'invisible et nous permettent d'estimer les règles topologiques qui assurent l'harmonie et la fonctionnalité des structures moléculaires.

L'esthétique des formes architecturales a reposé depuis des siècles sur le nombre d'or. Il semble certain que la découverte empirique du nombre d'or remonte à l'antiquité la plus reculée. La présence effective du nombre d'or apparaît dans des œuvres d'art antérieures à la civilisation hellénique, notamment dans celles de l'Égypte ancienne. Mais c'est aux Grecs que revient le mérite d'avoir élaboré une science de la géométrie avec d'illustres mathématiciens tels THALÈS, PYTHAGORE et EUCLIDE. Dans *Les Éléments* d'EUCLIDE, le nombre d'or apparaît comme un nombre irrationnel et y figure l'essentiel de ses propriétés. La plupart des historiens considèrent que le nombre d'or fut étudié avant EUCLIDE. Certains en attribuent l'étude à THÉODORE de Cyrène, d'autres à PYTHAGORE ou tout au moins aux Pythagoriciens. Le nombre d'or est associé aux propriétés des décagone et pentagone réguliers, ainsi qu'à celles du dodécaèdre dont les douze faces sont des pentagones réguliers convexes et de l'icosaèdre dont les vingt faces sont des triangles équilatéraux. Les architectes et les artistes de l'Antiquité gréco-romaine ont utilisé les propriétés du nombre d'or. Elles apparaissent dans les œuvres de PHIDIAS, et dans celles des architectes du siècle de PÉRICLÈS, dans la grande pyramide de Gizeh qui remonte à 4 600 ans avant J.C. et dans celle de CHEOPS. La valeur esthétique du nombre d'or fut transmise aux Romains ; VITRUVIUS en proclama la beauté.

Dès le XIII^e siècle *Les Éléments* d'EUCLIDE firent l'objet d'une large diffusion en Europe occidentale grâce à une traduction en latin par le mathématicien CAMPANUS

[20] N. DE CUES (1450) *Le Profane (Idiota)*, Seghers, Paris

[21] B. RUSSELL (1969) *Signification et Vérité*, trad. fr. Ph. DEVAUX, Flammarion, Paris

[22] P. TACUSSEL (1992) *op. cit.*

de Novare. A cette époque, FIBONACCI, dit LÉONARD de Pise, écrivit un traité, *Liber Abaci*, dans lequel il développa une série de nombres, la *série de FIBONACCI*, qui aboutissait au nombre d'or. En 1509, le moine franciscain Fra Luca PACIOLI DI BORGIO, mathématicien renommé qui comptait parmi ses amis des artistes célèbres tels Piero DELLA FRANCESCA, LÉONARD DE VINCI et Albert DÜRER, publia un ouvrage intitulé *Divina proportione* concernant le nombre d'or qu'il désigna par les termes de *proportio divina*. Il s'était peut-être inspiré de l'écrit du peintre mathématicien Piero DELLA FRANCESCA, consacré aux cinq corps platoniciens, *De quinque corporibus regularis*. A cette période la philosophie de PLATON suscita un grand intérêt. L'ouvrage de Luca PACIOLI, rédigé en langue toscane, qui semble le premier traité consacré au nombre d'or, fut illustré par LÉONARD DE VINCI. Ce dernier nomma le nombre d'or *sectio aurea* et l'utilisa dans la réalisation de ses peintures, en particulier dans la célèbre MONA LISA. Les artistes du Moyen-Age et de la Renaissance l'appliquèrent dans la conception de leurs œuvres. La Renaissance fut marquée par l'usage des mathématiques. La section dorée fut largement utilisée par MICHEL-ANGE. KEPLER la considérait comme l'un des trésors de la géométrie. Il en avait déjà mentionné l'existence dans les formes végétales^[23].

Mais après KEPLER, la *sectio aurea* tomba dans l'oubli jusque vers 1850 où l'Allemand ZEYSING la redécouvrit. Il remarqua que le nombre d'or se retrouve dans les proportions du corps humain, de celui des espèces animales qui se distinguent par l'élégance de leurs formes, dans les espèces végétales ainsi que dans certains temples grecs et même en musique. Il effectua lui-même des mesures sur des milliers de corps humains et trouva que ces proportions constituaient l'expression d'une loi statistique moyenne pour les corps sagement développés. Il fut le premier à observer la section dorée comme module dans le Parthénon. Il *[ZEYSING] résume ainsi d'une façon générale les causes de la préexcellence esthétique de la section dorée en montrant qu'elle introduit en plus de l'asymétrie (chère depuis PASTEUR à la chimie organique, comme le nombre impair l'était aux dieux), une continuité à l'infini ou faculté de se répéter, de se réfléchir indéfiniment*^[23]. Plus récemment, le nombre d'or suscita l'intérêt de quelques artistes parmi lesquels les peintres SÉRUSIER, DALI, PICASSO et l'architecte LE CORBUSIER. Ce dernier élaborait en 1943 un système de proportions entre les parties du corps humain, appelé *Modulor*, qu'il appliqua dans ses constructions. A l'aube du XXI^e siècle, l'architecte Norman FOSTER l'utilisa dans la conception du viaduc de Millau. En photographie, CARTIER-BRESSON respecta le nombre d'or. Il est clair que le nombre d'or a une fonction esthétique.

Le nombre d'or, désigné par la lettre ϕ en hommage à PHIDIAS, représente un invariant remarquable. Basé initialement sur des considérations géométriques, le premier calcul connu du nombre d'or date de 1597. Il fut donné dans une lettre à KEPLER par son premier étudiant Michael MAESLIN.

[23] M. GHYKA (1927) *op. cit.*

Considérons la proportion a/b établie sur une ligne droite :



Le nombre d'or est défini par la relation : $\phi = \frac{a}{b} = \frac{1}{2}(\sqrt{5} + 1) = 1,618$.

Il est la racine positive de l'équation suivante : $\phi^2 - \phi - 1 = 0$. Son inverse est : $1/\phi = 0,618$ ^[24] et son carré : $\phi^2 = 2,618$. C'est une progression géométrique :

$$\phi^3 = \phi^2 + \phi$$

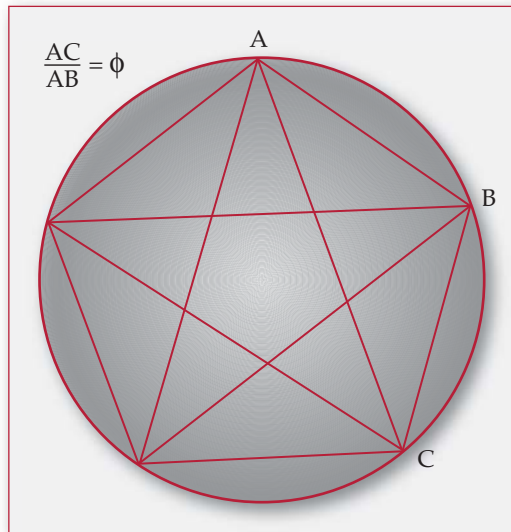
$$\phi^4 = \phi^3 + \phi$$

$$\phi^n = \phi^{n-1} + \phi^{n-2}$$

La série $1, \phi, \phi^2, \phi^3, \dots$ présente la propriété d'être à la fois multiplicative et additive ; c'est une progression arithmétique et géométrique.

La série de FIBONACCI fut définie à l'occasion de recherches mathématiques sur la prolifération des lapins ! Cette série revient finalement à la précédente. FIBONACCI, étudiant le comportement de sa série, en particulier les propriétés du rapport u_n/u_{n-1} , fut conduit au nombre d'or. Une série de FIBONACCI est définie par $u_n = u_{n-1} + u_{n-2}$, chaque nombre étant la somme des deux nombres précédents. Lorsque n tend vers l'infini, la série converge vers le nombre d'or.

Le nombre d'or est présent dans diverses figures géométriques. Dans le pentagone, le rapport du côté du pentagone étoilé au côté du pentagone convexe est égal au nombre d'or (figure 2).



2

Le pentagone régulier convexe de côté AB et le pentagone régulier étoilé de côté AC

[24] Remarquons que la dimension de l'ensemble de CANTOR, la *poussière triadique*, ensemble infiniment irrégulier, est un nombre irrationnel : $D = \log 2 / \log 3 = 0,6903$, très voisin de l'inverse du nombre d'or.

NOETHER E.	119
NORTH A.C.T.	28
NORTHROP J.H.	23
NOTUÉ J.P.	47

O

OLSON A.J.	108
ONUCHIC J.R.	104
ORENGO C.A.	56, 64

P

PACIOLI DI BORGIO L.	10
PANOFKY E.	66
PAULING L.	25, 26, 34, 35, 42, 55
PENROSE R.	120
PEREZ J.C.	43
PERHAM R.N.	85-87
PÉRICLÈS	9
PERRAULT C.	14
PERROIS J.P.	47
PERUTZ M.	27, 33-36
PETERSON E.A.	22
PHIDIAS	9, 10
PHILLIPS D.C.	28
PICASSO P.	10
PICCARD J.	29
PINNER A.	29
PIRIE N.W.	32
PLATON	1, 3, 5-8, 10, 95, 97, 99, 116-118
POINCARÉ H.	3, 120
POPPER K.	116, 117
PORATH J.	22
PTITSYN O.B.	104
PYTHAGORE	3, 7, 9, 81, 99

R

RANDALL J.	34, 35
RAO S.T.	54, 61
RAY F.A.	94, 95
REDFIELD R.R.	23
RICH A.	41
RICHARDSON D.	57, 58
RICHARDSON J.	74
ROSSMANN M.G.	54, 61, 93
ROYER W.E.	87, 88

RUSSELL B.	9
RUYER R.	15

S

SAINT-SERNIN B.	15
SANGER F.	23
SARKAR S.	17
SCHLAICH J.	51
SCHMIDT G.M.J.	89
SCHRAMM W.L.	81
SCHRÖDINGER E.	32, 34
SCHULZ F.N.	22
SCHULZE E.	30
SELA M.	101
SÉRUSIER P.	10
SHORE V.C.	28
SINSHEIMER R.	43
SMITH T.	23
SOBER H.A.	22
SOCRATE	1, 117
SOMMERFELD A.	24
SØRENSEN S.P.L.	21
STANLEY W.M.	23, 32
STEIN W.H.	23
STENT G.	33
STOKES A.R.	36
STOTZ E.H.	20
STRAND K.	87, 88
SUGER	66
SUMNER J.B.	22, 23
SURNELLS M.B.	56
SURRIDGE C.	25
SUSSMAN J.L.	42
SVEDBERG T.	21
SYNGE R.L.M.	22

T

TACUSSEL P.	5
TATUM E.L.	30
THALÈS	9
THÉODORE DE CYRÈNE	9
THOM R.	15, 16
THOMAS D'AQUIN	14
THORNTON J.	56
THURUMALAI D.	104
TIMOFEEFF-RESSOVSKY N.	32

- | | | | |
|----------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| TISELIUS A. | 21 | WEAVER D.L. | 103 |
| TSAI C.J. | 93 | WEINBERG S. | 120 |
| TSOU C.L. | 24 | WEIZMANN C. | 65 |
| TULASNE R. | 31 | WETLAUFER D.B. | 101 |
| U | | WEYL H. | 120 |
| UNGER B. | 29 | WHITE G.W. | 101 |
| URBAIN VIII | 68 | WHITEHEAD A.N. | 4 |
| V | | WIEBER F. | 113 |
| VALÉRY P. | 1 | WIKOLF W.R. | 93 |
| VARGHESE J.N. | 82 | WILKINS M.H.F. | 33-36, 40 |
| VENDRELY C. | 31 | WILLSTÄTTER R.M. | 20, 22, 23 |
| VENDRELY R. | 31 | WILSON H.R. | 33, 36 |
| VICQ D'AZYR F. | 14 | WITKOWSKI J.A. | 30, 34 |
| VIGNEAUD V. DU | 24 | WITTGENSTEIN L. | 117 |
| VITRUVIUS | 9 | WOLYNES P.G. | 104, 108 |
| W | | WRINCH D. | 25, 30 |
| WALDSCHMIDT-LEITZ E. | 22 | WUNENBURGER J.J. | 4, 7, 123 |
| WANG G. | 93 | WYMAN J. | 79, 108, 112, 121 |
| WANG J. | 44 | Y | |
| WATSON J.D. | 33-36, 40, 44, 91 | YON-KAHN J. | 20, 27, 61, 100, 113 |
| | | Z | |
| | | ZEYSING A. | 10, 13 |