



# NAISSANCE DE LA PHYSIQUE

DE LA SICILE À LA CHINE

■ Michel SOUTIF





NAISSANCE DE LA PHYSIQUE  
DE LA SICILE À LA CHINE

## *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 "Naissance de la physique"*

- S. JOHSUA, Professeur à l'Université de Provence
- J. LAMBERT, Professeur à l'Université Pierre Mendès-France, Grenoble 2
- P. NOZIÈRES, Professeur au Collège de France
- J.B. ROBERT, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1
- E. SALTIEL, Maître de conférences à l'Université Paris 7 - INRP

Grenoble Sciences reçoit le soutien  
du **Ministère de l'Éducation nationale**, du **Ministère de la Recherche**,  
de la **Région Rhône-Alpes**, du **Conseil général de l'Isère**  
et de la **Ville de Grenoble**.

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

Illustration de couverture : **Alice Giraud**

**ISBN 2-86883-589-9**

© EDP Sciences, 2002

# NAISSANCE DE LA PHYSIQUE DE LA SICILE À LA CHINE

**Michel SOUTIF**



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 vital à savoir (*J. Le Coarer*) - Electrochimie des solides (*C. Déportes et al.*) - Thermodynamique chimique (*M. Oturan & M. Robert*) - Chimie organométallique (*D. Astruc*)

Introduction à la mécanique statistique (*E. Belorizky & W. Gorecki*) - Mécanique statistique. Exercices et problèmes corrigés (*E. Belorizky & W. Gorecki*) - La symétrie en mathématiques, physique et chimie (*J. Sivardière*) - 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*) - La mécanique quantique. Problèmes résolus, Tomes 1 et 2 (*V.M. Galitsky, B.M. Karnakov & V.I. Kogan*) - Analyse statistique des données expérimentales (*K. Protassov*)

Exercices corrigés d'analyse, Tomes 1 et 2 (*D. Alibert*) - Introduction aux variétés différentielles (*J. Lafontaine*) - Analyse numérique et équations différentielles (*J.P. Demailly*) - 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, Tomes 1 et 2 (*Ph.J. Haug*)

Bactéries et environnement. Adaptations physiologiques (*J. Pelmont*) - Enzymes. Catalyseurs du monde vivant (*J. Pelmont*) - La plongée sous-marine à l'air. L'adaptation de l'organisme et ses limites (*Ph. Foster*) - L'ergomotricité. Le corps, le travail et la santé (*M. Gendrier*) - Endocrinologie et communications cellulaires (*S. Idelman & J. Verdetti*)

L'Asie, source de sciences et de techniques (*M. Soutif*) - La biologie, des origines à nos jours (*P. Vignais*)

Minimum Competence in Scientific English (*J. Upjohn, S. Blattes & V. Jans*) - Listening Comprehension for Scientific English (*J. Upjohn*) - Speaking Skills in Scientific English (*J. Upjohn, M.H. Fries & D. Amadis*)

## *Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques*

Radiopharmaceutiques. Chimie des radiotraceurs 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*)

## AVANT-PROPOS

De nombreux ouvrages<sup>1</sup> traitent de l'histoire de la physique et de son épanouissement au xx<sup>e</sup> siècle.

D'autres envisagent l'évolution de la pensée scientifique au contact des mystères de la nature et la manière dont, d'analyses en synthèses, de grandes lois naturelles ont permis de rendre compte de notre environnement.

L'objet de cet ouvrage est plus modeste. Il souhaite mettre en lumière l'interaction constante entre la science et ses applications au cours de leur développement. Les besoins d'agir sur la nature ont stimulé l'étude des phénomènes afin de les dominer et cette domination, à son tour, a ouvert de nouveaux horizons aux savants. Il faut montrer à chaque étape de la conquête scientifique son influence sur la société et son économie, et comment à son tour cette dernière a poussé les états à intervenir dans la recherche.

L'interaction science, économie, histoire politique n'a jamais été aussi flagrante que dans le domaine des sciences physiques, théoriques et appliquées. C'est pourquoi, à chaque étape de l'ouvrage, j'insiste sur les applications et leur impact sur la civilisation de l'époque.

Une autre évidence, bien rarement soulignée, permet de répondre à la question suivante : pourquoi la physique s'est-elle développée en Eurasie, mais non en Afrique, en Amérique ou dans une île du Pacifique ? Pourtant, à la fin du paléolithique, il n'y a pas si longtemps (environ 9 000 ans avant J.C.), la plupart des groupements humains disposaient du même outillage lithique et se figuraient la nature sous une même forme chamanique où tout était soumis aux caprices d'innombrables entités démoniaques.

La réponse tient essentiellement au fait que l'Eurasie s'étend d'Est en Ouest et permet une forte **circulation** des idées sans barrière équatoriale ou maritime. La naissance de la physique est due à l'accumulation d'innombrables observations ou réflexions qui ont pu se compléter et former peu à peu un tout cohérent. Toute la différence dans les techniques dont disposent un Américain et un Papou<sup>2</sup> tient de cette *communication*. Mais, pour comprendre l'importance de ce facteur clé, il ne faut

---

1. Voir bibliographie en fin d'ouvrage.

2. Le patrimoine génétique et les qualités intellectuelles de ces deux individus sont par ailleurs identiques, avec peut-être un petit avantage pour le Papou confronté très jeune à une lutte difficile contre un milieu physique très hostile. Ainsi un Papou pourra survivre à New York tandis qu'un Américain seul aura du mal à résister à la forêt de Nouvelle-Guinée.

pas se borner, comme le font la plupart des auteurs, à l'étude d'un élément de la chaîne eurasiatique, le bassin méditerranéen ou, à la rigueur, un peu du Moyen-Orient. Il faut donner toute sa place, dans la contribution essentielle à l'émergence de notre civilisation, à l'Extrême-Orient et en particulier à la Chine.

Pour bien mettre en évidence cette circulation des idées, l'exposé est divisé en chapitres portant chacun sur un phénomène physique arbitrairement individualisé, mais pour rétablir l'unicité de la discipline, un dernier chapitre montre l'histoire des interactions de l'ensemble de la physique avec la sphère politique de l'époque.

En conclusion, les raisons de l'éclipse provisoire de la contribution chinoise aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles seront évoquées.

Puisque chaque jour  
Se renouvelle  
Renouvelle-toi chaque jour  
Et toujours renouvelle-toi.

禮記 (Li Ji, Livre des rites)

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement mes collègues de Grenoble, J. BORNAREL, J. LAMBERT, Ph. NOZIÈRES et J.B. ROBERT avec lesquels de nombreuses discussions m'ont permis de reformuler complètement l'exposé de cet ouvrage. Je remercie également de leurs critiques très constructives Madame E. SALTIEL et Monsieur JOSUAH.

Je suis en outre infiniment reconnaissant envers ma femme, Ruth, pour l'aide qu'elle m'a apportée dans la correction des épreuves successives.

Je voudrais enfin remercier de leur travail minutieux toute l'équipe d'édition de Grenoble Sciences, Sylvie BORDAGE, Aline CEPEDA, Christiane GUIRAUDIE, Thierry MORTURIER et Julie RIDARD.



# CHAPITRE I

## LES PREMIERS ESSAIS D'INTERVENTION SUR LA NATURE : LES OUTILS ET LES ARMES

L'homme en face de la nature cherche à l'observer puis à intervenir pour l'utiliser en sa faveur. En fait, il commence son intervention bien avant d'avoir les idées claires sur la physique et, pour cela, il prolonge ses capacités grâce à des outils, dont la complexité croissante rythme l'éveil de la civilisation.

En 1836, le *Guide des antiquités nordiques*, du Danois Christiaan J. THOMSEN, propose de distinguer des phases de l'évolution humaine qui deviendront classiques : âge de la pierre, âge du bronze, âge du fer.

Nous allons voir dans quelles conditions sont intervenues ces découvertes fondamentales, quels ont été les usages de ces produits et quelles en ont été les conséquences sur la société. Il convient d'ajouter que deux métaux particuliers ont également joué un rôle important vis-à-vis de l'économie : l'or et l'argent.

### LES DÉBUTS DE L'OUTILLAGE LITHIQUE EN EURASIE<sup>1</sup>

La distinction entre l'homme et ses précurseurs hominidés n'est pas facile et prête à controverse. On utilise des critères purement physiologiques : capacité crânienne, forme de la colonne vertébrale à la base du crâne, forme du pharynx, aptitude à la bipédie, et des critères fondés sur des qualités cognitives traduites par la forme des outils en pierre. Les outils ont plusieurs usages et peuvent revêtir plusieurs formes. Ils servent à couper et façonner le bois, à forer des trous dans l'os, à découper les proies, récolter les plantes et racler des peaux. Pour toutes ces tâches, le tranchant obtenu est essentiel, et A. LEROI-GOURHAN a chiffré la progression de la technique par la longueur linéaire de tranchant obtenu pour 1 kg de matière première (silex). On trouve ainsi 10 cm de tranchant il y a 2 MA<sup>2</sup>, 40 cm il y a 0,5 MA, 200 cm il y a 50 000 ans, 2 000 cm il y a 2 000 ans et 7 000 cm à la fin du paléolithique, il y a

---

1. M. OTTE, *Les Paléolithiques inférieur et moyen en Europe*, Armand Colin, 1996.

Y. COPPENS, *Le Genou de Lucy*, Odile Jacob, 1999, p. 76.

2. MA : Million d'Années.

10000 ans. Les trois derniers résultats sont obtenus par passage du *nucleus* aux éclats puis aux microlites (progression des figures 1, 2 et 3).

Voyons maintenant une brève chronologie de cette évolution :

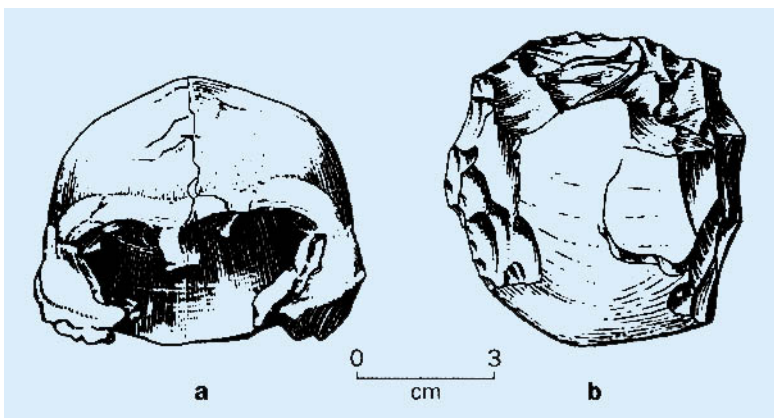
**Phase initiale en Eurasie** - L'*Homo erectus* passe d'Afrique en Asie. Sur ce continent, on en trouve les traces les plus anciennes à Java, datées de 1,8 MA. Récemment, on a trouvé des outils datés de 1,36 MA dans le Nord de la Chine, à *Xiao Chang Liang*<sup>3</sup>. L'*homme de Pékin* (ou *sinanthrope*) semble vieux de 800 000 ans (site de *Zhou Kou Dian*). Puis on le retrouve en Europe. La mandibule de *Dmanisi* au Caucase date d'environ 1 MA et l'on trouve en Europe centrale et en France, au Vallonet (près de Menton), des galets aménagés et des éclats massifs datant de 0,9 MA, à peu près identiques à ceux de Chine.

### L'*Homo erectus*

A l'occasion de changements climatiques qui affectent l'Afrique de l'Est (plus sec, plus froid), de grands singes anthropoïdes se redressent. Vers 4.5 MA on trouve un bipède encore arboricole, *Ardipithecus*, puis 1 MA plus tard des australopithèques se déplaçant au sol sur des distances de plus en plus grandes. L'un d'entre eux, *A. anamensis*, serait l'ancêtre de *Homo habilis* vers 3 MA : encéphale de 600 à 800 cm<sup>3</sup>, dentition d'omnivore, fabricant d'outils de pierre aménagés consciemment et diversifiés en fonction de leur usage.

A partir de 1,8 MA, le descendant d'*Homo habilis* a la stature bipède définitive et va se répandre à partir de l'Afrique de l'Est dans toute l'Eurasie. On lui donne arbitrairement le nom de *Homo erectus*.

Cette industrie très grossière a pris beaucoup de retard sur celle des hommes restés en Afrique qui taillent déjà des bifaces à partir de 1,6 MA.



**1 - a - Crâne de l'*Homo erectus* de Zhou Kou Dian  
b - Galet aménagé biface massif**

3. R.X. ZHU *et al.*, *Nature* 413, 2001.

**De 0,7 MA à 0,5 MA** - On trouve, très dispersés en Europe, des vestiges lithiques frustes et un premier élément de squelette, la mandibule de *Mauer* (près de Düsseldorf) datée de 0,6 MA : il s'agit d'une forme robuste d'*Homo erectus*.

**La crise de 0,5 Ma à 0,3 MA** - Apparition, dans de nombreux espaces artisanaux en Espagne et en France, de la tradition de bifaces, dite *acheuléenne*. On observe également l'apparition des premiers foyers à *Terra Amata* (Nice), vers 0,35 MA. Il s'agit sans doute d'une deuxième vague d'immigrants venant d'Afrique, probablement à travers le détroit de Gibraltar (largeur au minimum de 15 kilomètres). On observe également des vestiges acheuléens en Angleterre et en Allemagne, mais la plupart des sites européens n'en sont qu'aux galets massifs de la première vague d'occupation : c'est en particulier le cas de *Tautavel* (Pyrénées-Orientales) où l'abri sous roche de la Caune de l'Arago date plutôt de 0,4 MA.

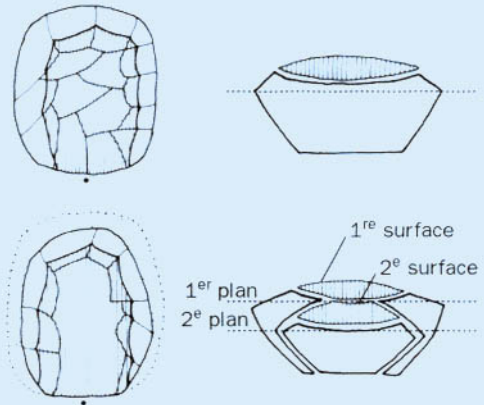
**De 0,3 MA à 0,1 MA** - La population croît et l'industrie progresse. Le bloc de silex est d'abord mis en forme par le choc de percuteurs tendres (bois de cerf), puis on en extrait des éclats, débités sous des formes très variées, adaptés à des usages spécifiques : c'est le débitage Levallois qui conduit à l'acquisition de plus de 60 outils différents. Le saut technique essentiel réside dans le remplacement du noyau façonné par les éclats extraits du noyau.

### Le débitage Levallois

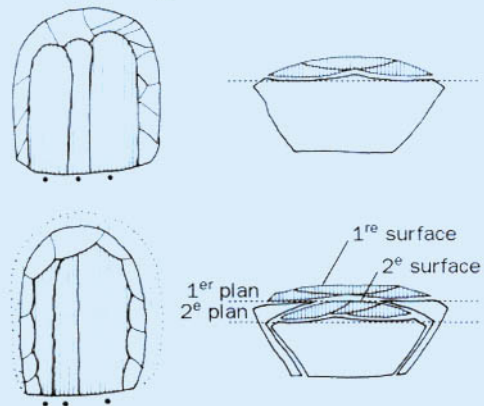
Cette technique est une méthode essentielle pour la fabrication de lames de pierre. Après une préparation du *nucleus* en surface bombée, des petits coups (jusqu'à 20 impacts différents) détachent des lamelles de silex après lesquelles, directement dans la forme appropriée à l'usage recherché. Le *nucleus* n'est plus l'outil lui-même mais la source d'un grand nombre d'outils.

La prévision du résultat recherché et sa mise en œuvre marquent une étape importante dans les possibilités intellectuelles de l'ouvrier. Le nom provient du lieu de la première mise en évidence de cette technique : Levallois-Perret, près de Paris.

#### Débitage LEVALLOIS à éclat(s) préférentiel(s)



#### Débitage LEVALLOIS récurrent



### 2 - Schémas de débitage Levallois

**De 100 000 à 30 000 ans** - C'est la période *moustérienne* occupée par l'homme de *Neandertal*, forme anatomique trapue et grande capacité crânienne. Cette période recouvre le dernier interglaciaire (*Riss-Würm*) et la première moitié de la dernière glaciation : les habitats sous abri et dans les grottes se généralisent, ainsi que la pratique des sépultures.

L'outillage sur éclats continue à se diversifier avec des traditions régionales. On note des différences suivant la nécessité ou non d'économiser la matière première et les réseaux d'approvisionnement s'étendent. Mais l'homme de *Neandertal* reste limité à l'Europe et au Moyen-Orient.

**La transition de 40 000 à 30 000 ans** - L'homme moderne apparaît progressivement. Son origine reste discutée (*Eve africaine* de D. WALLACE et A. WILSON ?), mais il a probablement transité par le Proche-Orient puisqu'on le trouve en Israël à Gafzeh, dans un site qui est daté de 92 000 ans, où il coexiste avec des néandertaliens et utilise le même outillage (datation par R.P.E. et électroluminescence)<sup>4</sup>. Cet homme moderne, dit *de Cro-Magnon*, va développer des expériences techniques combinées (couteaux, grattoirs, burins) et l'usage de l'os. On trouve de grands outils plats et foliacés, des lames à retouches écailleuses et des sagaies en bois de renne.

C'est à cette époque que l'homme sort de l'utilitaire et invente l'art. Bijoux (pendeloques), statuettes (VÉNUS de Brassempouy, environ 22 000 avant J.C.) et surtout fresques pariétales dont les plus anciennes, dans la grotte *Chauvet*, remontent à 34 000 ans.

## LES DÉBUTS DE L'OUTILLAGE MÉTALLIQUE

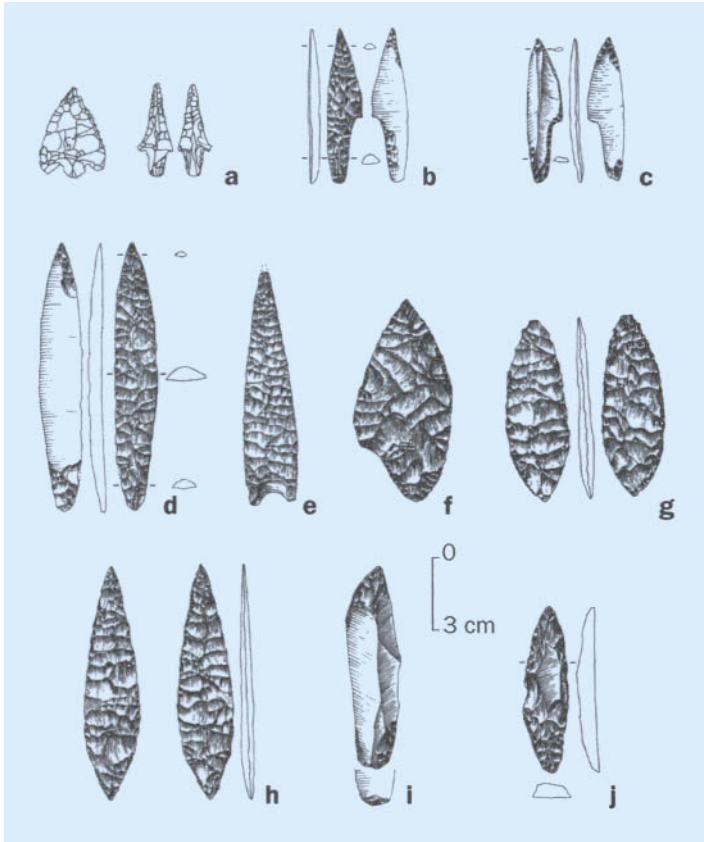
Lorsque l'homme s'est fixé auprès d'un champ ou a construit un enclos pour animaux domestiques, il a partout, avec des fortunes diverses, construit des récipients d'argile cuite. Cette invention de la céramique a parfois même précédé l'agriculture, comme ce fut le cas au Japon des Aïnous avec la poterie *Jomon* (11 000 avant J.C.).

L'usage des métaux est venu ensuite, mais il n'a pas le même caractère d'universalité. Il est au contraire devenu l'apanage de quelques civilisations qui en ont tiré leur puissance militaire et économique. Car il ne suffit pas de chauffer, avec ou sans discernement, la substance adéquate, il faut faire subir au minerai une vraie réaction chimique : la réduction.

L'invention de cette opération, née au Moyen-Orient, a diffusé avec des vitesses diverses, à travers l'Eurasie, et a subi le cumul progressif de toutes les innovations en circulant à travers un continent dont l'orientation générale est-ouest facilite les contacts, en n'imposant pas des barrières climatiques trop redoutables.

---

4. Archéométrie, *Dossiers d'Archéologie* 253, mai 2000.



**3 - Principaux types de pointes solutréennes**  
19 000 à 16 000 avant J.C.

Il est vrai que quelques rares échantillons de certains métaux existent à l'état dit *natif* : le cuivre, l'or, le fer météoritique, mais leur rareté les a tenus à l'écart d'une utilisation de type industriel.

C'est probablement le cuivre natif qui est apparu le premier sous forme ouvrée en Mésopotamie, au IX<sup>e</sup> millénaire et sous forme fondue en Anatolie, à Çatal Höyük, vers 6000 avant J.C. C'est le cas aussi de la hache d'*Hibernatus*, mort en 3200 avant J.C. en traversant les Alpes d'Italie vers l'Autriche.

C'est également le cas des bijoux sumériens en *métal du ciel*, fer météoritique inoxydable employé dès 3500 avant J.C. (les météorites métalliques contiennent une forte proportion de nickel, c'est ainsi que celle qui est tombée en France, à La Caille, en 1828, était en fer avec 9,8% de nickel et pesait 626 kg).

Mais la métallurgie proprement dite dont nous allons maintenant parler est née à Sumer, vers 3500 avant J.C., pour le cuivre. Elle a été ensuite maîtrisée par les Egyptiens dès la III<sup>e</sup> dynastie, en 2800 avant J.C.

## LE CUIVRE

### *Les minerais de cuivre et leur traitement*

Ces minerais sont assez répandus et très faciles à détecter grâce à leur couleur. Les grandes mines de l'Antiquité ont été à Chypre (d'où le nom du métal), dans le Sinaï (les mines du roi SALOMON), autour de An Yang en Chine. Actuellement, l'essentiel de la production est au Chili.

Les minerais sont des oxydes comme la cuprite ou des hydrocarbonates verts ou bleus, comme la malachite ou l'azurite. Le plus répandu est la chalcoppyrite  $\text{CuFeS}_2$  de couleur noire.

Les dérivés oxydés, ou carbonatés, sont traités par le charbon de bois dans des fours où l'on entasse des couches successives de minerai et de combustible. Le rôle du charbon de bois est double : il porte l'ensemble à la température de réaction et réduit l'oxyde en prenant l'oxygène pour donner  $\text{CO}_2$ . Le cuivre coule au fond en se séparant de la gangue, à condition de dépasser sa température de fusion, soit  $1083^\circ\text{C}$ , ce qui est assez difficile.

Les dérivés sulfurés sont également chauffés mais on ajoute un fondant (silicate) qui se combine au fer pour donner une croûte légère. Puis on injecte de l'air qui oxyde une partie du  $\text{CuS}$  en  $\text{CuO}$ , et on laisse la réaction se poursuivre :



La réaction est exothermique et le cuivre coule.



Les premières coulées donnaient de petits lingots de quelques dizaines de centimètres. Puis la fabrication s'est standardisée pour conduire à Chypre à des éléments en forme de peau de bœuf de 2 talents (environ 70 kilogrammes), destinés à l'exportation dans toute la Méditerranée orientale et particulièrement vers les grandes puissances de l'époque : les Hittites et les Egyptiens.

#### **4 - Transport d'un lingot de cuivre**

Relevé d'une tombe thébaine

Bien entendu, les objets cassés ou usés étaient recyclés dès 3500 avant J.C. (à Uruk) dans des moules ouverts.

Cette métallurgie à l'air libre conduisait à une certaine perte du métal par vaporisation. Dans des carottes de glace du Groenland, S. HONG *et al.*<sup>5</sup> ont trouvé des traces de pollution atmosphérique, correspondant aux périodes où d'énormes quantités de monnaie de cuivre ont été fabriquées : soit à la période romaine autour du début de notre ère, soit à l'épanouissement de la dynastie SONG en Chine, vers 1100.

5. S. HONG, J.P. CANDELONE, M. SOUTIF et C.F. BOUTRON, *Science of the Total Environment*, Elsevier, avril 1996.



## *Usages du cuivre*

Les propriétés du cuivre tranchent complètement sur celles de la pierre par sa plasticité, et sur celles du bois par sa résistance.

C'est donc un nouveau matériau qui va remplacer les précédents et ouvrir de nouvelles applications.

Ainsi, les premières roues en bois s'usaient rapidement sur leur pourtour. Elles sont alors renforcées par des clous de cuivre à partir de 3000 avant J.C., en Ur et à Kish, puis revêtues d'un bandage complet à partir de 2000 avant J.C., à Suse.

Des outils en cuivre, écrouis par martelage ont été utilisés pendant une assez courte période avant de passer aux divers alliages. Des montages en bois renforcés de feuilles de cuivre aux endroits stratégiques utilisent la grande facilité d'obtention de feuilles minces par martelage et recuits. La fabrication de clous apporte de nouvelles possibilités. Divers objets de décoration ou de bijouterie voient également le jour.

## **LE BRONZE**

La plupart des minerais de cuivre renferment, en plus ou moins grande quantité, des impuretés d'antimoine, de plomb, d'arsenic ou d'étain. D'où l'apparition, involontaire au départ, d'alliages : un peu d'étain en Anatolie vers 3000 avant J.C., du plomb et de l'antimoine en Mésopotamie.

Puis les bronzes à l'arsenic se développent grâce à la coexistence avec les sulfures de cuivre, d'arséniates et de sulfoarséniates (par exemple, l'énergite  $\text{Cu}_3\text{AsS}$ ). Ils ont d'excellentes propriétés, mais les ouvriers meurent comme des mouches. Aussi, finalement, c'est le bronze à l'étain, de propriétés métallurgiques analogues, qui est retenu en Egypte et dans la culture indo-européenne.

## *Usages du bronze*

Contrairement au cuivre, le bronze est un métal dur qui peut s'affûter et conserver son tranchant. Il permet donc de réaliser des armes très supérieures à celles qui existaient avant son apparition : pointes de lances ou de javelots, épées, haches.

Mais sans doute l'avantage militaire fondamental apporté par le métal réside dans ses propriétés de frottement. Elles permettent de réaliser des essieux tournant dans des paliers où le frottement (lubrifié avec de la graisse animale) est sans rapport avec le contact bois sur bois. Les véhicules ainsi équipés sont maniables et,

### **Propriétés du cuivre**

Le cuivre est un métal relativement mou et c'est pourquoi il sera rapidement détrôné par des alliages présentant de bien meilleures propriétés métalliques. Son point de fusion, à 1083°C, est en outre d'accès difficile avec le charbon de bois et la baisse de cette température, observée sur les alliages, confère à ceux-ci un avantage supplémentaire.

Par contre, on peut, par martelage et recuits successifs, en obtenir des feuilles extrêmement minces et des fils très fins.

combinés avec la vitesse permise par la traction hippique, vont donner une suprématie absolue aux possesseurs de chars.

A partir de l'Asie centrale de part et d'autre de la Mer Caspienne, les populations indo-iraniennes munies d'armes de bronze et dotées de chars légers vont envahir l'Inde, l'Iran et le Moyen-Orient. Leur langue et leurs mythes<sup>6</sup> vont submerger tout l'Ouest de l'Eurasie, jusque et y compris l'Irlande.

### Les minerais d'étain

L'étain existe sous forme d'oxyde  $\text{SnO}_2$ , la *cassitérite*. A part quelques nodules dans certains torrents, le minerai est rare. Au début, on le trouve dans le Caucase, en Perse, en Europe centrale, puis les Romains vont épuiser les mines du Nord-Ouest de l'Espagne et devoir aller en chercher en Grande-Bretagne. Actuellement, on le trouve en Malaisie et en Bolivie. Le traitement se fait par réduction au charbon de bois, mais le métal coule à 232°C et devient très volatil au-dessus de cette température, si bien que très souvent la cassitérite pulvérisée est déposée sur la surface d'un creuset rempli de cuivre et recouverte du charbon de bois. Lorsque l'ensemble est porté à la température de fusion du cuivre, l'étain est réduit et diffuse aussitôt dans le cuivre : le dosage est aisé et les pertes réduites, si bien que le trafic à longue distance porte plus sur la cassitérite que sur le métal.



5 - Principales sources d'étain en Europe

6. G. DUMEZIL, *Heur et Malheur du guerrier*, Flammarion, 1985.

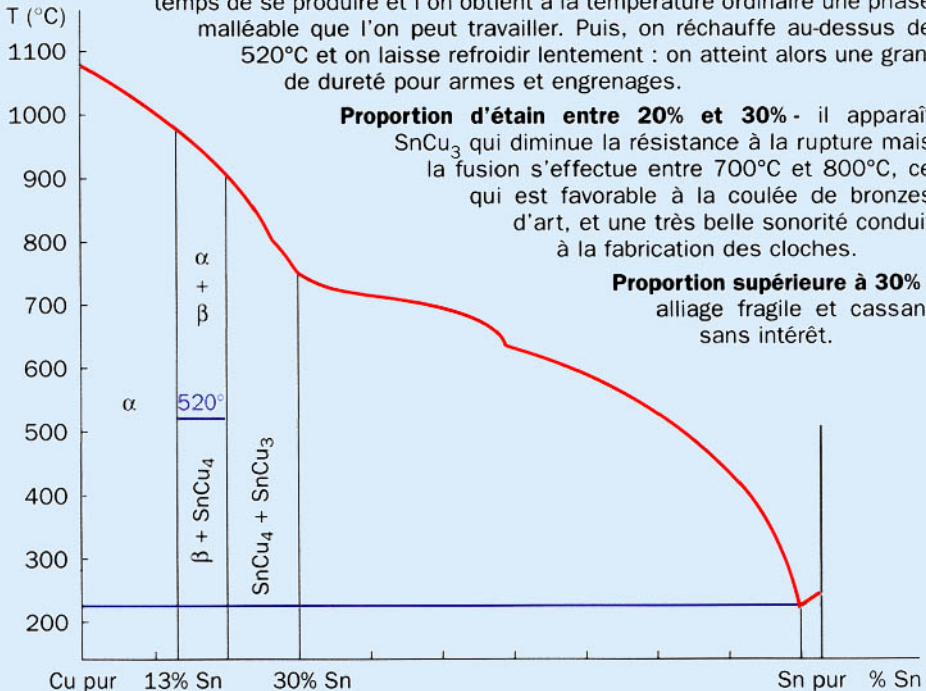


### Propriétés du bronze

Elles dépendent très fortement de la composition.

**Proportion d'étain inférieure à 13%** - la structure [a] est une simple solution solide de l'étain dans le cuivre, de propriétés réversibles et de résistance mécanique et dureté moyennes à froid. L'avantage essentiel est l'abaissement du point de fusion qui tombe au-dessous de 1000°C.

**Proportion d'étain entre 13% et 20%** - il apparaît à chaud une phase[b] très malléable qui se transforme en dessous de 520°C en une combinaison avec  $\text{SnCu}_4$  très dure. Si on refroidit très brutalement (trempe) la transformation n'a pas le temps de se produire et l'on obtient à la température ordinaire une phase malléable que l'on peut travailler. Puis, on réchauffe au-dessus de 520°C et on laisse refroidir lentement : on atteint alors une grande dureté pour armes et engrenages.



6 - Diagramme de fusibilité des alliages cuivre-étain

### Influence de l'usage du bronze sur la société

A cause de la rareté de l'étain, cette matière reste chère et n'est utilisée que pour l'armement ou l'usage des possédants et des temples.

Elle renouvelle cependant complètement l'art de la guerre avec les épées, les pointes de flèches ou de javelots, les pièces de chars rapides. A titre civil, elle donne des vases et récipients d'apparat ou cultuels, des instruments de musique à percussion. Mais elle ne pénètre absolument pas dans le monde des travailleurs qui reste celui de l'âge de pierre.

Son influence sur la société est peut-être rendue plus importante par les exigences de la fabrication dans deux domaines : la spécialisation des métiers et l'approvisionnement en matière première.

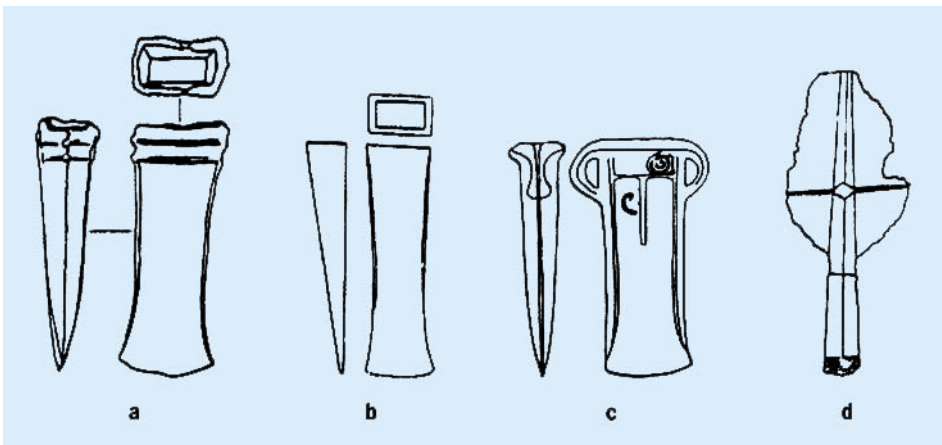
L'ouvrier métallurgiste est hautement spécialisé et se consacre entièrement à son travail. La société doit donc, en échange de ses fournitures, nourrir sa famille et, par suite, les paysans doivent produire plus de biens d'alimentation que pour eux-mêmes. Mais ceux-ci n'étant pas directement preneurs des produits métalliques en échange de nourriture, il faut des circuits d'échange complexes et hiérarchisés beaucoup plus subtils que dans la civilisation purement agricole du néolithique.

D'autre part l'étain est rare. Il faut parfois le faire venir de très loin, ce qui implique des caravanes, des marchands itinérants également spécialisés, fondant des comptoirs d'échanges à l'étranger, nécessitant une balance commerciale exacte. Ainsi les Assyriens, dès 1900 avant J.C., fondent un comptoir important à Kanesh, en Anatolie, pour y apporter des étoffes et de l'étain en échange de cuivre, d'or, d'argent et de laine. Ce centre commercial sera au cœur du développement ultérieur de la puissance hittite.

Tout cet ensemble de nouvelles occupations conduit donc à une réelle rupture dans l'organisation de la société néolithique agricole et non-spécialisée, et c'est pourquoi on parle souvent de *l'âge du bronze*.

### *Le bronze en Chine*

Le bronze apparaît subitement parfaitement maîtrisé, en même temps que l'art animalier de la steppe, au début de la dynastie SHANG (1530 avant J.C.). Quelques rares vases sont attribués à des dates antérieures (vers 1700 avant J.C.) au musée de Shanghai, mais aucun objet en cuivre pur ne semble avoir vu le jour en Chine. La technique métallurgique arrive directement en Chine par le sud de la Sibérie.



#### **7 - Haches en bronze**

a - b : Chinoises (x<sup>e</sup> siècle avant J.C.), c - d : Est de l'Oural, *Karakevichevo*

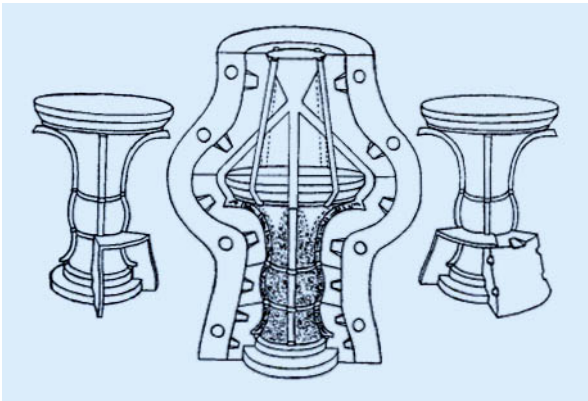
Cette route des steppes passe par le nord des déserts de Taklamakan et Gobi, par le Baïkal et le fleuve Amour. Cette région boisée et difficile d'accès est brusquement transformée en steppe par un réchauffement provisoire du climat de 1600 à 1250 avant J.C. et la culture d'*Andronovo*, située dans l'Oural et liée aux Indo-européens, va brusquement être ainsi en liaison avec la Chine en Mongolie et dans les *Ordos* (forme des épées et des haches).

Les objets chinois en bronze sont des armes, des pièces de char et des vases cultuels. On les retrouve dans les sépultures cruciformes d'An Yang (1300 avant J.C.), qui renferment des chars avec leurs chevaux et des sacrifices humains. Ces objets sont l'apanage d'une classe noble et héréditaire qui va gouverner jusque vers 840 avant J.C. (apparition de la phase *Printemps et Automnes*).



**8 - Bronze SHANG**  
1400 avant J.C.

En Europe, les vases en bronze se font à l'unité par la méthode de la cire perdue (le vase est façonné en cire dans une enveloppe d'argile, puis l'ensemble est chauffé et la cire fond ; on coule alors le bronze à sa place). En Chine, on préfère construire des moules démontables permettant une fabrication en petite série.



**9 - Moule démontable  
pour vase de bronze**  
Dynastie SHANG

## APPARITION DU FER

Malgré l'abondance et la grande répartition des minerais, la diffusion du fer s'est faite bien après celle du bronze, en raison des difficultés de sa métallurgie. Celle-ci tient à deux facteurs : la haute température de fusion du métal et la complexité de ses alliages avec le carbone, rendus obligatoires par la technique de préparation

usuelle. Les premiers objets manufacturés se trouvent dans le Caucase et le Nord mésopotamien vers 2500 avant J.C. : ce sont des ornements et des armes de cérémonie de fabrication déficiente et sans avantage sur le bronze.

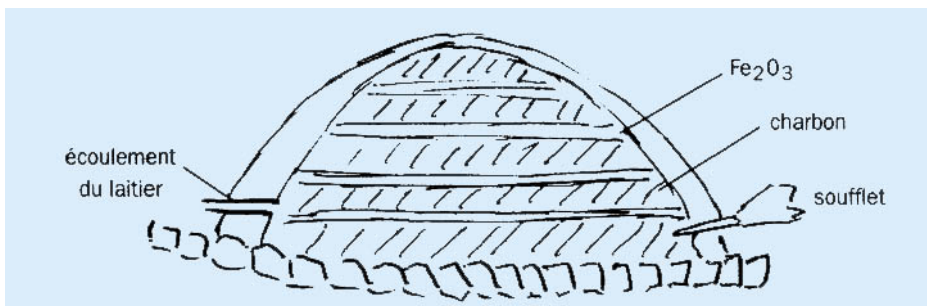
Une meilleure maîtrise de la réduction du minerai est réalisée, et surtout la découverte fortuite de la cémentation superficielle et de l'acier est faite vers 1500 avant J.C. par une peuplade d'Arménie, sujette des Hittites, les Chalybes. Les Hittites en retirent leur supériorité militaire de 1400 à 1200 avant J.C. Quand ils s'effondrent devant les peuples de la mer, la technique va diffuser dans tout le Moyen-Orient. Les Philistins (descendants des peuples de la mer) en héritent vers 1100 avant J.C., puis les Assyriens et les Egyptiens vers 850 avant J.C. Le fer fait l'objet de gros trafics (18 tonnes de lingots dans les ruines de Mari, celles provenant de l'occupation par l'Assyrien TUKULTI-NINURTA, vers 1200 avant J.C.).

### ***Le minerai et son traitement***

Le fer est présent partout car c'est le dernier élément produit par fusion thermonucléaire dans les étoiles lourdes (supérieures à 8 fois le soleil). Il représente 17% de la composition de la terre (50% pour l'oxygène, 14% pour le silicium). Il est présent dans la croûte sous forme d'oxyde  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , hématite rouge ou jaune (hydraté) ou divers ocres, de sulfures (pyrites) ou de carbonates. Un oxyde particulier  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , la *magnétite*, est le seul produit naturel ferromagnétique.

Les sulfures et carbonates sont grillés et ramenés à  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  : on trouve encore les restes de grands fours à Alleverd, siège d'une mine de carbonate de fer très active dès la fin du Moyen Âge.

La fabrication du fer consiste donc essentiellement en la réduction de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  par le charbon de bois, dans un bas fourneau où l'on entasse couches d'oxyde et de charbon de bois avec un fondant, pour donner des scories liquides (le laitier) avec les corps étrangers.



**10 - Schéma d'un bas fourneau**

Avec les fours du Moyen-Orient, on est très loin d'atteindre la température de fusion du fer ( $1535^\circ\text{C}$ ), ou même des alliages fer-carbone les plus fusibles ( $1145^\circ\text{C}$ ). Par conséquent, le produit est obtenu à l'état **solide** sous forme d'une éponge renfermant du laitier dans ses mailles. On réchauffe cette éponge vers  $1000^\circ\text{C}$  : le fer

<b>V - LA MATIÈRE ET LE VIDE</b>	73
<b>La matière</b>	73
La physique grecque	73
La suite en Europe	75
La physique de la matière en Chine	81
<b>Le vide et le plein</b>	83
En Occident	83
En Chine	86
Conclusion	88
<b>VI - LE CALENDRIER ET LE TEMPS</b>	91
<b>La notion primitive</b>	91
<b>Le calendrier</b>	92
Le calendrier mésopotamien	92
Le système grec	93
Le calendrier égyptien	93
Le calendrier indien	94
Le calendrier chinois	95
Le calendrier aztèque	96
Le temps dans le monde occidental	97
<b>La mesure du temps</b>	97
Définition de l'unité de temps	100
<b>Le temps, variable indépendante</b>	101
Le temps chez Platon (- 427 • - 348)	102
Le temps après Platon	102
L'apparition du temps absolu	103
L'origine de l'ère chrétienne : le zéro de notre référence actuelle	104
<b>VII - LA MÉCANIQUE : L'ÉQUILIBRE ET LE MOUVEMENT</b>	105
<b>L'étude du mouvement</b>	105
La mécanique d'Aristote en Grèce et au Moyen Âge	105
La mécanique de Galilée	107
La mécanique de Newton	109
La mécanique utilitaire	111
La mécanique chinoise	113
<b>Le cas particulier de la statique</b>	114
Archimède	114
La statique en Occident	115

<b>VIII - LA LUMIÈRE ET L'OPTIQUE</b>	117
<b>La perception lumineuse</b>	117
La lumière selon les Grecs	117
La lumière selon les Chinois	118
La contribution arabe	119
Le Moyen Âge occidental et l'optique arabe	120
Galilée	121
<b>Les théories de la lumière</b>	122
L'expression mathématique de la réfraction	122
L'hypothèse sur la nature de la lumière au XVII <sup>e</sup> siècle	123
La solution Fermat (1601 • 1665)	123
L'optique ondulatoire au XIX <sup>e</sup> siècle	124
La crise du corps noir	124
<b>Les applications</b>	125
Les instruments d'optique	125
Lunettes et télescopes	125
Microscopes	127
La vitesse de la lumière	127
La spectroscopie	129
<b>IX - LES ACTIONS À DISTANCE</b>	131
<b>Le magnétisme</b>	131
Le magnétisme terrestre et la Chine	131
Le magnétisme en Europe	134
La déclinaison	134
<b>Les vibrations mécaniques</b>	136
Généralités sur la musique	136
La musique grecque et mésopotamienne	137
La musique chinoise	138
Le tempérament	141
La propagation des ondes	142
<b>L'électromagnétisme</b>	143
Les lois de l'électricité	143
Les ondes électromagnétiques	145
<b>X - LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ET SA TRANSMISSION</b>	147
<b>Introduction</b>	147
<b>L'animal, le vent, l'eau et le gaz</b>	148
L'énergie animale et l'homme	148
Le vent	152
L'eau	153
Le pétrole, le gaz et l'eau salée	158