

Louis de Broglie et la technologie quantique

S. DINER

Institut de Biologie Physico-Chimique
13, rue Pierre et Marie Curie, 75005 Paris

L'oeuvre de Louis de Broglie présente plusieurs aspects. Dans sa thèse de 1924 il développe l'idée d'associer une onde à toute particule matérielle, une des idées les plus révolutionnaires du siècle, que l'expérience confirme tout en laissant la porte ouverte à un immense débat scientifique.

Par la suite l'attitude critique de Louis de Broglie vis à vis de l'interprétation de la Mécanique Quantique et ses tentatives infructueuses pour lui donner une "apparence plus physique", ont longtemps contribué à le mettre en marge de la communauté des physiciens.

Mais au cours des soixante cinq ans écoulés depuis la prédiction de l'existence d'un phénomène ondulatoire associé à toute particule microphysique, les multiples expériences n'ont fait que confirmer massivement la présence de l'onde de de Broglie pour l'électron, le neutron et finalement les atomes.

La manifestation la plus spectaculaire de l'onde de de Broglie n'est peut être pas tant dans ses vertus explicatives des propriétés de la matière, que dans son "exploitation" à des fins technologiques. C'est grâce aux ondes de matière, les ondes électroniques en l'occurrence, que l'on peut enfin voir les atomes dans le microscope électronique ou le microscope à effet tunnel. C'est la présence de l'onde qui donne aux comportements des électrons dans les semi-conducteurs les caractéristiques mises à profit dans la microélectronique. Enfin des expériences d'interférences atomiques laissent entrevoir un avenir riche d'applications.

Contrairement à l'attitude relativement passive qui prévalait lors de la phase initiale de la physique quantique, où l'objectif primordial était de rendre compte de la constitution de la matière, il s'agit maintenant

d'utiliser les propriétés quantiques de la matière et de la lumière à des fins technologiques. La microélectronique et les technologies du laser en sont les meilleurs exemples.

On assiste véritablement à la constitution d'une Technologie Quantique, avec toutes les caractéristiques d'un système technique global poursuivant la recherche d'une maîtrise fine des phénomènes complexes.

Ceci entraîne des exigences nouvelles vis à vis de la théorie quantique, provoquant des développements théoriques et mettant l'accent sur des questions peu considérées jusqu'alors. Il y a là souvent un défi pour l'enseignement de la physique quantique. Il y a là une menace permanente salutaire pour l'appareil quantique et son interprétation. La pression technologique s'avère comme toujours source de développement et de renouveau. Des expériences mettant en jeu les principes et les interprétations de la mécanique quantique sont effectivement réalisées dans des laboratoires industriels (Hitachi, IBM, ATT, Bell). Des congrès sont réunis sur les rapports entre la technologie et les fondements de la théorie quantique.

Situation que Louis de Broglie aurait particulièrement appréciée. Car cet homme réservé et timide, qui paraissait perdu dans son monde intérieur, connaissait parfaitement les applications de ses travaux et descendait volontiers des altitudes de la relativité et de la mécanique quantique pour étudier en détail la radio ou l'électronique dont il connaissait les derniers progrès.

Bibliographie d'orientation sur la technologie quantique

La technologie.

- B. GILLE, ed. Histoire des techniques. Encyclopédie de la Pléiade. Gallimard. 1978.
- B. JACOMY. Une histoire des techniques. Points-Sciences. Le Seuil. 1990.
- J.Y. GOFFI. La philosophie de la technique. Q.S.J. Presses Universitaires de France. 1988.
- F. RAPP. Interdisciplinary Science Reviews. vol.10 n°2, p126-139, 1985. The philosophy of technology: a review.
- H. REICHL, ed. Micro System. Technologies 90. 1st International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanic Systems and Components. Springer Verlag 1990.

- P. BALL, L. GARWIN. Nature 355, 27 February 1992. Nanotechnology. Science at the atomic scale.
- P. AIGRAIN. La Vie des Sciences. Compte Rendus de l'Académie des Sciences, série générale, tome 9, 1992, n° 2, p 143-155. Le chœur des technologies.
- OBSERVATOIRE FRANCAIS DES TECHNIQUES AVANCEES. Arago 12. Nanotechnologies et micromachines. Masson . 1992

Mécanique quantique.

- C. COHEN-TANNOUJDI. B. DIU. F. LALOE. Mécanique quantique. Vol. 1 et 2. Hermann. 1977.
- L. DE BROGLIE. Les incertitudes d'Heisenberg et l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire. Gauthiers Villars. 1982.
- L.E. BALLENTINE. Quantum mechanics. Prentice Hall. 1989.
- G. LOCHAK. S. DINER. D. FARGUE. L'objet quantique. Flammarion. 1989.
- Théorie quantique de l'observation, de la mesure et de l'information. Mesures quantiques non-destructives (Cf. Optique Quantique).*
- L. DE BROGLIE. La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire. (Interprétation usuelle et interprétation causale). Gauthiers Villars. 1957.
- C.W. HELSTROM. Quantum detection and estimation theory. Academic Press. 1976.
- V.V. MITIUGOV. Fondements physiques de la théorie de l'information (en russe). La Radio Soviétique. Moscou. 1976.
- V. B. BRAGINSKY, Yu.I. VORONTSOV, K.S. THORNE. Science. **209**, 547, 1980. Quantum nondemolition measurements.
- C.M. CAVES, K.S. THORNE, R.W.P. DREVER, V.D. SANDBERG and M. ZIMMERMAN. Review of Modern Physics. **52**, 341, 1980. On the measurement of a weak classical force coupled to a quantum-mechanical oscillator. I. Issues of principle.
- A.S. KHOLEVO. Probabilistic and statistical aspects of quantum theory. North-Holland. 1982.
- G.J. MILBURN, D.F. WALLS. Physical Review **A28**, 2065, 1983. Quantum nondemolition measurements via quadratic coupling.

- J.A. WHEELER, W.H. ZUREK, eds. Quantum theory and measurement. Princeton University Press. 1984.
- N. IMOTO, H.A. HAUS and Y. YAMAMOTO. Physical Review **A32**, 2287, 1985. Quantum nondemolition measurement of the photon number via the optical Kerr effect.
- A. BLAQUIERE, S.DINER, G. LOCHAK, eds. Information, complexity and control in quantum physics. Springer Verlag. 1987.
- Yu.I. VORONTSOV. Théorie et méthodes des mesures macroscopiques (en russe). Naouka.Moscou. 1989.
- S. REYNAUD. Annales de Physique. **15**, 63-162, 1990. Introduction à la réduction du bruit quantique.
- P. BUSCH, P.J. LAHTI, P. MITTELSTAEDT. The quantum theory of measurement. Springer Verlag. 1991.
- C.W. GARDINER. Quantum Noise. Springer Verlag. 1991.
- V.B. BRAGINSKY, F.Ya. KHALILI. Quantum measurement. Cambridge University Press. 1992.

Physique du solide. Systèmes mésoscopiques.

- N.W. ASHCROFT. N.D. MERMIN. Solid state physics. Holt,Rinehart, Winston. N.Y. 1976.
- T. ANDO. A.B. FOWLER. F. STERN. Reviews of Modern Physics. **54**, 438-621, April 1982. Electronic properties of two-dimensional systems.
- Y. IMRY. The physics of mesoscopic systems. Dans G. Grinstein et E. Mazonko, eds. Directions in condensed matter physics. World Scientific. Singapore. 1986.
- B.L. ALTSCHULER. P.A. LEE. Physics Today. **41**, 36, 1988. Disordered electronic systems.
- D. THOULESS. Dans "The New Physics" edited by P.Davies. Cambridge University Press. 1989. Condensed matter physics in less than three dimension.
- L.J. CHALLIS. Contemporary Physics. **33**, 111, 1992. Physics in less than three dimensions.

La nanoélectronique. Les composants quantiques présents et futurs.

- S. DATTA. Quantum phenomena on solid state devices. Addison Wesley. 1987.

- A. REED, W.P. KIRK, eds. Nanostructure physics and fabrication. San Diego, CA Academic. 1989.
- M. JAROS. Physics and applications of semi-conductor microstructures. Oxford U.P. 1989.
- F. CAPASSO, ed. Physics of quantum electron devices. Springer Verlag. 1990.
- G. BASTARD. Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures. Les Editions de Physique. 1988, 1991.
- D.K. FERRY, J.R. BARKER, C. JACOBONI, eds. Granular nanoelectronics. Plenum Publishing Corporation. 1991.
- EHRENREICH, TURNBULL. Solid state physics. Vol 44. Academic Press. 1991.
- C. WEISBUCH, B. VINTER. Quantum semiconductor structures. Academic Press. 1991.
- R.F.W. PEASE, ed. Proceedings of the IEEE. **79**. August 1991. Special issue on Nanoelectronics.
- L. ESAKI, ed. Highlights in condensed matter physics and future prospects. Plenum Publishing Corporation. 1991.
- M. REED, ed. Nanostructured systems. Semiconductors and metals. **35**, 1992. Academic Press.
- W.P. KIRK, M. REED, eds. Nanostructures and mesoscopic systems. Academic Press. 1992.
- S. WASHBURN, R.A. WEBB. Reports on Progress in Physics. **55**, 1311-1383, 1992. Quantum transport in small disorderd samples from the diffusive to the ballistic regime.
- S. TIWARI. Compound semiconductor device physics. Academic Press. 1992.

Articles de vulgarisation.

- Physics Today. Special issue: Nanoscale and ultra fast devices. February 1990.
- H.I. SMITH, H.G. CRAIGHEAD. Nanofabrication.
- K. HESS. Supercomputer images of electron device physics.
- D.H. AUSTON. Probing semiconductors with fem to second pulses.

A.F.J. LEVI, R.M. NOTTENBURG, Y.K. CHEN and M.B. PANISH. Ultrahigh speed dipolar transistors.

F. CAPASSO and S.DATTA. Quantum electron devices.

Science. **254**, 29 November 1991. Special issue: Engineering a small world: From atomic manipulation to microfabrication.

G.M. WHITESIDES, J.P. MATHIAS, C.T. SETO. Molecular self-assembly and nanochemistry: a chemical strategy for the synthesis of nanostructures.

J.A. STROSCIO and D.M. EIGLER. Atomic and molecular manipulation with the scanning tunneling microscope.

N. SUNDARAM, S.A. CHALMERS, P.F. HOPKINS, A.C. GOS-SARD. New quantum structures.

K.D. WISE and K. NAJAFI. Microfabrication techniques for integrated sensors and microsystems.

F. LAZARD. Science et Technologie. Numéro spécial Eté 1991. N° 37-38. Processeurs quantiques: l'avenir de l'électronique.

C. WEISBUCH et al.. La Recherche n° 237. Novembre 1991. L'avènement de la nanoélectronique.

R.W. KEYES. Contemporary Physics **32**, p 403, 1991. Limits and challenges in electronics.

K. LIKHAREV, T. CLAESON. Pour la Science. n° 178, août 1992. L'électronique ultime.

M.A. KASTNER. Reviews of Modern Physics. **64**, July 1992. The single electron transistor

L.L. CHANG, L. ESAKI. Physics Today. October 1992. Semiconductor quantum heterostructures.

L'effet Bohm-Aharonov.

S. OLARIU, I. POPESCU. Reviews of Modern Physics. **57**, 339,1986. The quantum effects of electromagnetic fluxes.

Y. IMRY, R.A. WEBB. Scientific American. April 1989. Quantum interference and the Aharonov- Bohm effect.

L'épitaxie par jet moléculaire.

B.A. JOYCE. Reports on Progress of Physics. **48**, 1637, 1985. Molecular beam epitaxy.

M.A. HERMAN, H. SITTER. Molecular beam epitaxy fundamentals and current status. Springer Verlag 1989.

B.A. JOYCE. Contemporary Physics. **32**, 21, 1991. Molecular beam epitaxy of semi conductor films-atomic dimension control and the evaluation of crystal growth dynamics.

Electronique moléculaire.

M. BORISSOV, ed. Molecular electronics. World Scientific. Singapore. 1987.

D.S. CHEMLA, J. ZYSS, eds. Non linear optical properties of organic molecules and crystals. Academic Press. 1987.

OBSERVATOIRE FRANCAIS DES TECHNIQUES AVANCEES. Arago 7. L'électronique moléculaire. Masson. 1988.

F.L. CARTER, ed. Molecular electronic devices. North-Holland. 1991.

A. AVIRAM, ed. Molecular electronics. Science and technology. American Institute of Physics. 1992.

S.G. SLIGAR, F.R. SALEMME. Current Opinion in Structural Biology. **2**, 587, 1992. Protein engineering for molecular electronics.

Micromécanique.

L. DESCHAMPS. Science et Technologie. Spécial Eté 1991. n° 37-38. Les micromachines du XXI^e siècle seront japonaises. Du microcapteur au micromoteur.

G. STYX. Scientific American. November 1992. Trends in micromechanics. Micron machinations.

L'effet tunnel. Le microscope à effet tunnel. Le microscope à force atomique.

E.L. WOLF. Principles of electron tunneling spectroscopy. Oxford University Press. 1985.

D.K. ROY. Quantum mechanical tunnelling and its applications. World Scientific. Singapore. 1986.

R.J. BEHM, N. GARCIA and H. ROHRER, eds. Scanning tunneling microscopy and related methods. Kluwer. 1990.

R. WIESENDANGER, H.J. GÜNTHERODT, eds. Scanning tunneling microscopy. Springer 1992.

- H.K. WICKRAMASINGHE, ed. Scanned probe microscopy. American Institute of Physics. 1992.
- C. JOACHIM, S. GAUTHIER, eds. Scanning probe microscopy. Les Editions de Physique. 1992.
- R. KASSING, ed. Scanning microscopy. Springer Verlag. 1992.
- L.E.C. VAN DE LEEMPUT, H. VAN KEMPEN. Reports on Progress in Physics. **55**, 1165-1240, 1992. Scanning tunneling spectroscopy.
- J. STROSCIO, W. KAISER, eds. Methods of experimental physics. vol. 27. Academic Press. 1992. Scanning tunneling microscopy.

Articles de vulgarisation.

- R. BINNIG, H.ROHRER. Pour la Science. Octobre 1985. Le microscope à balayage à effet tunnel.
- B. SMITH, D. CHOUGHAN. La Recherche. Décembre 1991. Quels microscopes pour demain?
- D. RUGAR, P. HANSMA. Physics Today. October 1990. Atomic force microscopy. P.K. HANSMA, V.B. ELINGS, O. MARTI, C.E. BRACKER. Science. **242**, 14 October 1988. Scanning tunneling microscopy and atomic force microscopy: application to biology and technology.
- J.A. STROSCIO and D.M. EIGLER. Science. **254**, 29 November 1991. Atomic and molecular manipulation with the scanning tunneling microscope.
- P. ZEPPENFELD, D.M. EIGLER et E.K. SCHWEIZER. La Recherche. Mars 1992. On manipule même les atomes.

**Optique électronique (Interférences, diffraction, holographie).
Microscopie électronique.**

- M.A. VAN HOVE, W.H. WEINBERG, C.M. CHAN. Low energy diffraction. Experiment, theory and surface structure determination. Springer Verlag. 1986.
- E. RUSKA. Reviews of Modern Physics. **59**, 627, 1987. The development of the electron microscope and of electron microscopy.
- L. REIMER. Transmission electron microscopy. Physics of image formation and microanalysis. Springer Verlag. 1989.

- P. BUSECK, J. COWLEY, L.R. EYRING. High resolution transmission electron microscopy and associated techniques. Oxford University Press. 1989.
- A. TONOMURA. Reviews of Modern Physics. **59**, 639, 1987. Applications of electron holography.
- A. TONOMURA. Physics Today. April 1990. Electron holography: a new view of the microscopic.
- H. LICHTÉ. Advances in Optical and Electron Microscopy. Vol 12. 1991. Electron image plane off-axis holography of atomic structures.

Microscope à effet de champ ionique.

- T. SAKURAI, A. SAKAI, H.W. PICKERING, eds. Advances in Electronics and Electron Physics. Supplement 20. 1989. Atom-probe field ion microscopy and its application.
- T.T. TSONG. Atomic probe field ion microscopy. Field ion emission, and surfaces and interfaces at atomic resolution. Cambridge University Press. 1990.

Optique quantique. Lasers.

- W.H. LOUISELL. Quantum statistical properties of radiation. Wiley. 1973.
- R. LOUDON. The quantum theory of light. Oxford University Press. 1983.
- R. LOUDON and P. KNIGHT, eds. Squeezed light. Journal of Modern Optics. Special issue: **34**, 709-1020, 1987.
- H.J. KIMBLE and D.F. WALLS, eds. Squeezed states of the electromagnetic field. Journal of the Optical Society of America B. Special issue: **4**, 1449-1741, 1987.
- P.W. MILONNI, J.H. EBERLY. Lasers. Wiley. 1988.
- P. KNIGHT. Dans "The New Physics" edited by P.Davies. Cambridge University Press. 1989. Quantum optics.
- P. MEYSTRE, M. SARGENT III. Elements of quantum optics. Springer Verlag. 1990.
- S. REYNAUD. Annales de Physique. **15**, 63-162, 1990. Introduction à la réduction du bruit quantique.

- B.E.A. SALEH, M.C. TEICH. Fundamentals of photonics. Wiley. 1991.
- R.A. MEYERS, ed. Encyclopedia of lasers and optical technology. Academic Press. 1991.
- C.W. GARDINER. Quantum noise. Springer Verlag. 1991.
- P. MEYSTRE, D.F. WALLS, eds. Non classical effects in quantum optics. American Institute of Physics. 1991.
- J. WHINNERY, ed. Proceedings of the IEEE. Vol 80, march 1992. Special issue on Quantum Electronics.
- M. MASHAAL. La Recherche. Juin 1992. Les photons découvrent leurs semi conducteurs.
- E. GIACOBINO, C. FABRE, eds. Applied Physics **B55**. September 1992. Special issue: Quantum noise reduction in optical systems-Experiments.

La manipulation des atomes par la lumière.

- V.G. MINOGIN, V.S. LETOKHOV. Laser light pressure on atoms. Gordon and Breach. 1987.
- Journal of the Optical Society of America **B6**, 1989. Special issue: Laser cooling and trapping of atoms.
- C. COHEN TANNOUJJI, W.D. PHILLIPS. Physics Today. October 1990. New mechanisms for laser cooling.
- C.J. FOOT. Contemporary Physics. 32 (6), 369, 1991. Laser cooling and trapping of atoms.
- A.P. KAZANTSEV, G.I. SOURDOUTOVICH, V.P. YAKOVLEV. L'action mécanique de la lumière sur les atomes. (en russe). Naouka. 1991.
- J.E. BJORKHOLM. Laser cooling and trapping of atoms . Dans "Encyclopedia of Lasers and Optical Technology" .Academic Press. 1991.
- S. CHU. Scientific American. February 1992. Laser trapping of neutral molecules.
- E. ARRIMONDO, W.D. PHILIPS, eds. Laser manipulation of atoms and ions. (Proceedings of Enrico Fermi Summer School 1991). Academic Press. 1992.

Optique atomique.

- V.I. BALYKIN, V.S. LETOKHOV. Physics Today. April 1989. Laser optics of neutral atomic beams.

- D.E. PRITCHARD. Atomic Physics 12. J.E. Zorn and R.R. Lewis, eds. American Institute of Physics. N.Y. 1991. Atom optics.
- J. MLYNEK, V. BALYKIN, P.MEYSTRE, eds. Applied Physics **B54**, May 1992. Special issue : Optics and interferometry with atoms.
- R. POOL. Science. **225**, 1513, 1992. Optic's new focus: beams of atoms.

Interférométrie atomique.

- O. CARNAL, J. MLYNEK. Physical Review Letters. **66**, 2689, 1991. Young's double slit experiment with atoms: a simple atom interferometer.
- D.W. KEITH, C.R. EKSTROM, Q.A. TURCHETTE, D.E. PRITCHARD. Physical Review Letters. **66**, 2693, 1991. An interferometer for atoms.
- F. RIEHLE, Th. KISTERS, A. WITTE, J. HELMCKE, Ch.J. BORDE. Physical Review Letters. **67**, 177, 1991. Optical Ramsey spectroscopy in a rotating frame: Sagnac effect in a matter-wave interferometer.
- M. KASEVICH, S. CHU. Physical Review Letters. **67**, 181, 1991. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions.
- B. GOSS LEVI. Physics Today. July 1991. Atoms are the new wave in interferometers.
- J. ROBERT, CH. MINIATURA, S. LE BOITEUX, J. REINHARDT, V. BOCVARSKI and J. BAUDON. Europhysics Letters. **16**, 29, 1991. Atomic interferometry with metastable hydrogen atoms.
- J. ROBERT, CH. MINIATURA, O. GORCEIX, S. LE BOITEUX, V. LORENT, J. REINHARDT, and J. BAUDON. Journal de Physique II. p 601, Avril 1992.
- J. MLYNEK, V. BALYKIN, P.MEYSTRE, eds. Applied Physics **B54**, May 1992. Special issue : Optics and interferometry with atoms.
- O. CARNAL, J. MLYNEK. La Recherche. Septembre 1992. L'optique atomique.

Communications quantiques.

- C. BENDJABALLAH, O. HIROTA, S. REYNAUD, eds. Quantum aspects of optical communications. Springer 1991.
- J.P. DELAYAHE. Pour la Science. Août 1992. Cryptographie quantique.

J.G. RARITY, P.R. TAPSTER. Applied Physics **B55**, 298, September 1992. Quantum communications.

C.H. BENNETT, G. BRASSARD and A.E. EKERT. Scientific American. October 1992. Quantum cryptography.

G. BRASSARD. Cryptographie moderne. Masson. 1992.

Calculateurs quantiques.

R.P. FEYNMAN. Optics News. **11**, 11-20, 1985. Quantum mechanical computers.

D. DEUTSCH. Proceedings of the Royal Society of London **A400**, 97, 1985. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer.

D. DEUTSCH. Proceedings of the Royal Society of London **A425**, 73, 1989. Quantum computational networks.

Supraconducteurs. Effet Josephson. SQUID. Supraconducteurs haute température.

K.A. MULLER, J.G. BEDNORZ. Reviews of Modern Physics. **60**, 585-600, 1988. Perovskite-type oxides. The new approach to high Tc superconductivity.

H.S. KWOK, Y.H. KAO., D.T. SHAW, eds. Superconductivity and applications. Plenum Press. 1989.

J.C. PHILLIPS. Physics of high Tc superconductors. Academic Press. 1989.

V.Z. KRESIN, S.A. WOLF. Fundamentals of superconductivity. Plenum Press. 1990.

J. LYNN. High temperature superconductivity. Springer Verlag. 1990.

OBSERVATOIRE FRANCAIS DES TECHNIQUES AVANCEES. Arago 10. Applications de la supraconductivité. Masson. 1990.

F. GERVAIS. Les nouveaux supra-conducteurs. Lavoisier. Paris. 1991.

G. COSTABILE, S. PAGANO, N.F. PEDERSEN, M. RUSSO, eds. Non-linear superconductive electronics and Josephson devices. Plenum Press. 1991.

A. NARLIKAR, ed. Studies in high-temperature superconductors. Nova Science Publishers. Vol. 1 to 8. 1989-1991.