

and dosimetry of static and ELF electromagnetic fields. New York, London, Plenum Press, p. 243-271.

SCHWAN, H.P. & FOSTER, K.R. (1980) RF field interactions with biological systems: Electrical properties and biophysical mechanisms. *Proc. IEEE*, **68**: 104-113.

SCHWAN, H.P., ANNE, A., & SHER, L. (1966) Heating in living tissues. Philadelphia, US Naval Air Engineering Center (NAEC-ACEL-534).

SCHWARTZ, J.L., HOUSE, D.E., & MEALING, S.A.R. (1990) Exposure of frog hearts to CW or amplitude-modulated VHF fields: selective efflux of calcium ions at 16 Hz. *Bioelectromagnetics*, **11**: 349-358.

SCOTT, A.C. (1985) Soliton oscillations in DNA. *Phys. Rev. A.*, **31**: 3518-3519.

SCOTT, R.S., CLAY, L., STOREY, K.V., & JOHNSON, R.J. (1985) Transient microwave induced neurosensory reactions during superficial hyperthermia treatment. *Int. J. radiat. Oncol. Biol. Phys.*, **11**(3): 561-566.

SEAMAN, R.L. (1977) Effects of microwave radiation on Aplysia ganglion cells. In: Adey, W.R. & Bawin, S.M., ed. *Brain interactions with weak electric and magnetic fields*. pp. 45-48 (Neurosciences Research Programme Bulletin, **15**(1)).

SERVANTIE, A.M. & ETIENNE, J. (1975) Synchronization of cortical neurons by a pulsed microwave field as evidenced by spectral analysis of electrocorticograms from the white rat. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **247**: 82-86.

SERVANTIE, B., BERTHARION, G., JOLY, R., SERVANTIE, A.M., ETIENNE, J., DREYFUS, P., & ESCOUBET, P. (1974) Pharmacologic effects of a pulsed microwave field. In: Czerski, P., Ostrowski, K., Shore, M.L., Silverman, Ch., Suess, M.J., & Waldskog, B., ed. *Biological effects and health hazards of microwave radiation*. Warsaw, Polish Medical Publishers, pp. 119-127.

SHACKLETT, D.E., TREDICI, T.J., & EPSTEIN, D.L. (1975) Evaluation of possible microwave-induced lens changes in the United States Air Force. *Aviat. space environ. Med.*, **46**: 1403-1406.

SHANDALA, M. & ZVINYATSKOVSKY, YA. (1988) [Environment and health of the population.] Kiev, Zdorovja, p. 150 (in Russian).

SHANDALA, M., DUMANSKY, YU., & SERDYIUK, A. (1983) [Environmental electromagnetic factors and questions of their regulations.] In: [Experimental and practical problems in the biology of electromagnetic radiation.] Pushchino, Sbornik nauchnykh, pp. 113-122 (in Russian).

SHANDALA, M.G. & VIROGNODOV, G.I. (1990) Non-ionizing microwave radiation as autoimmune indicator. In: Abstracts, 12th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, June 1990, San Antonio, Texas, p. 102.

SHANDALA, M.G., RUDNEV, M.I., & NAVAKATIAN, M.A. (1977) Patterns of change in behavioral reactions to low power densities of microwaves (Abstract). International Symposium on the Biological Effects of Electromagnetic Waves (URSI), Airlie, Virginia, p. 88.

SHANDALA, M.S. & VINOGRADOV, G.I. (1982) [Autoallergic effects of electromagnetic energy (EHF) and their influence on the fetus and offspring.] *Vestn. Akad. Med. USSR*, **10**: 13-16 (in Russian).

SHELLOCK, F.G. & CRUES, J.V. (1987) Temperature, heart rate and blood pressure changes associated with clinical MR imaging at 1.5 T. *Radiology*, **163**: 259-262.

SHELLOCK, F. G. & CRUES, J.V. (1988) Temperature changes caused by MR imaging of the brain with a head coil. *Am. J. Neuroradiol.* **9**: 287-291.

SHELLOCK, F.G., SHAEFER, D.J., & CRUES, J.V. (1989) Alterations in body and skin temperatures caused by MR imaging: is the recommended exposure for radiofrequency radiation too conservative? *Br. J. Radiol.*, **61**: 904.

SHELTON, W.W. & MERRITT, J.H. (1981) *In vitro* study of microwave effects on calcium efflux in rat brain tissue. *Bioelectromagnetics*, **2**: 161-167.

SHEPPARD, A.R., BAWIN, S.M., & ADEY, W.R. (1979) Models of long-range order in cerebral macromolecules: Effects of sub-ELF and of modulated VHF and UHF fields. *Radio Sci.*, **14**(S): 141-145.

SHEPPARD, A.R., FRENCH, E., & ADEY, W.R. (1980) Extracellular alternating currents change firing rate in Aplysia pacemaker neurons. *Soc. Neurosci. Abstr.*, **6**: 197.

SIEKIERZYNSKI, M. (1972) The influence of microwave radiation on iron metabolism in rabbits. *Med. Lotnic.*, **39**: 53-77.

SIEKIERZYNSKI, M., CZERSKI, P., MILCZAREK, H., GIDYNSKI, A., CZARNECKI, C., DZIUK, E., & JEDRZEJCZAK, W. (1974a) Health surveillance of personnel occupationally exposed to microwaves. II. Functional disturbances. *Aerospace Med.* **45**: 1143-1145.

SIEKIERZYNSKI, M., CZERSKI, P., GIDYNSKI, A., ZYDECKI, S., CZARNECKI, C., DZIUK, E., & JEDRZEJCZAK, W. (1974b) Health surveillance of personnel occupationally exposed to microwaves III. Lens translucency. *Aerospace Med.*, **45**: 1146-1148.

SIGLER, A.T., LILIENFIELD, A.M., COHEN, B.H., & WESTLAKE, J.E. (1965) Radiation exposure in parents of children with mongolism (Down's Syndrome). *Bull. J. Hopkins Hosp.*, **117**: 374-399.

SISKEN, B.F., FOWLER, I., MAYAUD, C., RYABY, J.P., RYABY, J., & PILLA, A.A. (1986) Pulsed electromagnetic fields and normal chick development. *J. Bioelec.*, **5**: 25.

SKIDMORE, W.D. & BAUM, S.J. (1974) Biological effects in rodents exposed to 10^8 pulses of electromagnetic radiation. *Health Phys.*, **26**: 391.

SLINEY, D.H. (1988) Current RF safety standards. In: Repacholi, M.H., ed. *Non-ionizing radiations: physical characteristics, biological effects and health hazard assessment*. London, IRPA Publications, pp. 219-233.

SMIALOWICZ, R.J. (1976) The effect of microwaves (2450 MHz) on lymphocyte blast transformation *in vitro*. In: Johnson, C.C. & Shore, M.L., ed. *Biological effects of electromagnetic waves. Selected papers of the USNC/URSI Annual Meeting, Boulder, Colorado, October 1975*. Rockville, Maryland, US Department of Health, Education and Welfare, Vol.1, pp. 472-483 (HEW Publication (FDA) 77-8010).

SMIALOWICZ, R.J. (1984) Haematologic and immunologic effects. In: Elder, J.A. & Cahill, D.F., ed. *Biological effects of radiofrequency radiation*. Research Triangle Park, North Carolina, Health Effect Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, pp. 5-13-5-28 (EPA-600/8-83-026F).

SMIALOWICZ, R.J., RIDDLE, M.M., BRUGNOLOTTI, P.L., SPERRAZZA, J.M., & KINN, J.B. (1979a) Evaluation of lymphocyte function in mice exposed to 2450 MHz (CW) microwaves. In: Stuchly,

S.S., ed. *Electromagnetic fields in biological systems*. Edmonton, Canada, International Microwave Power Institute, pp. 122-152.

SMIALOWICZ, R.J., KINN, J.B., & ELDER, J.A. (1979b) Perinatal exposure of rats to 2450 MHz CW microwave radiation: Effects on lymphocytes. *Radio Sci.*, **14**: 147-153.

SMIALOWICZ, R.J., WEIL, C.M., MARSH, P., RIDDLE, M.M., ROGERS, R.R., & REHNBERG, B.F. (1981a) Biological effects of long-term exposure of rats to 970 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectromagnetics*, **2**: 279-284.

SMIALOWICZ, R.J., ALI, J.S., BERMAN, E., BURSIA, S.J., KINN, J.B., LIDDLE, C.G., REITER, L.W., & WEIL, C.M. (1981b) Chronic exposure of rats to 100-MHz (CW) radiofrequency radiation: Assessment of biological effects. *Radiat. Res.*, **86**: 488-505.

SMIALOWICZ, R.J., BRUGNOLOTTI, P.L., & RIDDLE, M.M. (1981c) Complement receptor positive spleen cells in microwave (2450 MHz) irradiated mice. *J. microwave Power*, **16**: 73-77.

SMIALOWICZ, R.J., WEIL, C.M., KINN, J.B., & ELDER, J.A. (1982) Exposure of rats to 425-MHz (CW) radiofrequency radiation: Effects on lymphocytes. *J. microwave Power*, **17**: 211-221.

SMIALOWICZ, R.J., ROGERS, R.R., GARNER, R.J., RIDDLE, M.M., LUEBKE, R.W., & TOWE, D.G. (1983) Microwaves (2,450 MHz) suppress murine natural killer cell activity. *Bioelectromagnetics*, **4**: 371-381.

SPALDING, J.F., FREYMAN, R.W., & HOLLAND, L.M. (1971) Effects of 800 MHz electromagnetic radiation on body weight, activity, haematopoiesis and life span in mice. *Health Phys.*, **20**: 421.

SPIEGEL, R.J. (1976) ELF coupling to spherical models of man and animals. *IEEE Trans. biomed. Eng.*, **23**: 387-391.

SPIEGEL, R.J. (1981) Numerical determination of induced currents in humans and baboons exposed to 60 Hz electric fields. *IEEE Trans. EMC*, **23**: 382-390.

SPIEGEL, R.J. (1982) The thermal response of a human in the near-zone of a resonant thin-wire antenna. *IEEE Trans. microwave Theory Tech.*, **30**: 177-184.

- SPIEGEL, R.J., DEFFENBAUGH, D.M., & MANN, J.E. (1980) A thermal model of the human body exposed to an electromagnetic field. *Bioelectromagnetics*, 1: 253-270.
- STEIN, J. M. (1985) Hand exposure to microwaves [letter]. *Ann. emerg. Med.*, 14 (3): 278-279.
- STERN, S., MARGOLIN, L., WEISS, B., & MICHAELSON, S.M. (1979) Microwaves: Effects on thermoregulatory behaviour in rats. *Science*, 206: 1198-1201.
- STOLWIJK, J.A.J., & HARDY, J.D. (1966) Temperature regulation in man - A theoretical study. *Pflugers Archiv.*, 291: 129-162.
- STOLWIJK, J.A.J. & HARDY, J.D. (1977) Control of body temperature. In: Lee, D.H.K., ed. *Handbook of physiology - Reactions to environmental agents*. Baltimore, Williams and Wilkins, Chapter 4.
- STORM, F.K., ELLIOTT, R.S., HARRISON, W.H., KAISER, L.R., & MORTON, D.L. (1981) Radiofrequency hyperthermia of advanced human sarcomas. *J. surg. Oncol.*, 17: 94-98.
- STRUZAK, R.G. (1982) Terrestrial electromagnetic environment. In: Rotkiewicz, W., ed. *Electromagnetic compatibility in radio engineering*. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, and Warsaw, Wydawnictwa komunikacji i Łączności, pp. 3-56.
- STRUZAK, R.G. (1985) Vestigial radiation from industrial, scientific, and medical radiofrequency equipment. In: Kikuchi, H., ed. *Nonlinear and environmental electromagnetics*. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, pp. 223-252.
- STUCHLY, M.A. (1977) Potentially hazardous microwave radiation sources: a review. *J. microwave Power*, 12: 370-381.
- STUCHLY, M.A. (1983) Fundamentals of the interactions of radiofrequency and microwave energies with health. In: Grandolfo, M., Michaelson, S. M., & Rindi, A., ed. *Biological effects and dosimetry of nonionizing radiation: radiofrequency and microwave energies*. New York, London, Plenum Press, pp. 75-93.
- STUCHLY, M.A. (1986) Human exposure to static and time-varying magnetic fields. *Health Phys.*, 51: 215-225.

- STUCHLY, M.A. & LECUYER, D.W. (1985) Induction heating and operator exposure to electromagnetic fields. *Health Phys.*, 49: 693-700.
- STUCHLY, M.A. & LECUYER, D.W. (1987) Electromagnetic fields around induction heating stoves. *J. microwave Power*, 22: 63-69.
- STUCHLY, M.A. & LECUYER, D.W. (1989) Exposure to electromagnetic fields in arc welding. *Health Phys.*, 56: 297-302.
- STUCHLY, M. A. & MILD, K. H. (1987) Environmental and occupational exposure to electromagnetic fields. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, 6: 15-17.
- STUCHLY, M.A. & STUCHLY, S.S. (1986) Experimental radio and microwave dosimetry. In: Polk, C. & Postow, E., ed. *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton, Florida, CRC Press, pp. 229-272.
- STUCHLY, M.A. & STUCHLY, S.S. (1987) Measurements of electromagnetic fields in biomedical applications. *CRC crit. Rev. biomed. Eng.*, 14: 241-288.
- STUCHLY, M.A. & STUCHLY, S.S. (1990) Electrical properties of biological substances. In: Gandhi, O.P., ed. *Biological effects and medical applications of electromagnetic fields*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall Inc., pp. 75-112.
- STUCHLY, M.A., REPACHOLI, M.H., LECUYER, D.W., & MANN, R. (1980) Radiation survey of dielectric (RF) heaters in Canada. *J. microwave Power*, 15: 113-121.
- STUCHLY, M.A., REPACHOLI, M.H., LECUYER, D.W., & MANN, R.D. (1982) Exposure to the operator and patient during short wave diathermy treatments. *Health Phys.*, 42: 341-366.
- STUCHLY, M.A., REPACHOLI, M.H., & LECUYER, D.W. (1983a) Operator exposure to radiofrequency fields near a hyperthermia device. *Health Phys.*, 45: 101-107.
- STUCHLY, M.A., REPACHOLI, M.H., LECUYER, D.W., & MANN, R.D. (1983b) Radiofrequency emissions from video display terminals. *Health Phys.*, 45: 772-775.
- STUCHLY, M.A., KRASZEWSKI, A., & STUCHLY, S.S. (1985) Exposure of human body models in the near- and far-field. A comparison. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BME-32: 609-616.

STUCHLY, M.A., SPIEGEL, R.J., STUCHLY, S.S., & KRASZEWSKI, A. (1986) Exposure of man in the near-field of a resonant dipole: comparison between theory and measurements. *IEEE Trans. microwave Theory Tech.*, **MTT-34**: 26-30.

STUCHLY, M.A., KRASZEWSKI, A., STUCHLY, S.S., HARTSGROVE, G.W., & SPIEGEL, R.J. (1987) Energy deposition in a heterogeneous model of man: near-field exposures. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **BME-34**: 944-950.

STUCHLY, M.A., RUDDICK, J., VILLENEUVE, D., ROBINSON, K., REED, B., LECUYER, D.W., TAN, K., & WONG, J. (1988) Teratological assessment of exposure to time-varying magnetic field. *Teratology*, **38**: 461.

STUCHLY, S.S., KRASZEWSKI, A., STUCHLY, M.A., HARTSGROVE, G., & ADAMSKI, D. (1985) Energy deposition in a model of man in the near-field. *Bioelectromagnetics*, **6**: 115-129.

STUCHLY, S.S., STUCHLY, M.A., KRASZEWSKI, A., & HARTSGROVE, G. (1986) Energy deposition in a model of man; frequency effects. *IEEE Trans. biomed. Eng.*, **BME-33**: 702-711.

STUCHLY, S.S., KRASZEWSKI, A., STUCHLY, M.A., HARTSGROVE, G., & SPIEGEL, R.J. (1987) RF energy deposition in a heterogeneous model of man: far-field exposures. *IEEE Trans. biomed. Eng.*, **BME-34**: 951-957.

SUESS, M.J. & BENWELL-MORISON, D.A., ed. (1989) Non-ionizing radiation protection, 2nd ed. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 346 pp. (European Series No. 25).

SULTAN, M.F., CAIN, C.A., & TOMPKINS, W.A.F. (1983a) Effects of microwaves and hyperthermia on capping of antigen-antibody complexes on the surface of normal mouse B lymphocytes. *Bioelectromagnetics*, **4**: 115-122.

SULTAN, M.F., CAIN, C.A., & TOMPKINS, W.A.F. (1983b) Immunological effects of amplitude-modulated radiofrequency radiation: B lymphocyte capping. *Bioelectromagnetics*, **4**: 157-166.

SZMIGIELSKI, S. & OBARA, T. (1989) The rationale for the Eastern European radiofrequency and microwave protection guides. In: Franceschetti, G., Gandhi O.P., & Grandolfo, M., ed. *Electromagnetic*

biointeraction - Mechanisms, safety standards, protection guides. New York, London, Plenum Press, pp. 135-151.

SZMIGIELSKI, S., SZUDZINSKI, A., PIETRASZEK, A., BIELEC, M., & WREMBEL, J.K. (1982) Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450 MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*, **3**: 179-191.

SZMIGIELSKI, S., BIELEC, M., LIPSKI, S., & SOKOLSKA, G. (1988) Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. In: Marino, A.A., ed. *Modern bioelectricity*. New York, Marcel Dekker, Inc., pp. 861-925.

SZUDZINSKI, A., PIETRASZEK, A., JANIAK, M., WREMBEL, J., KALCZEK, M., & SZMIGIELSKI, S. (1982) Acceleration of the development of benzopyrene-induced skin cancer in mice by microwave radiation. *Arch. dermatol. Res.*, **274**: 303-312.

TAKASHIMA, S., ONARAL, B., & SCHWAN, H.P. (1979) Effects of modulated RF energy on the EEG of mammalian brains. *Radiat. environ. Biophys.*, **16**: 15-27.

TAKASHIMA, S., GABRIEL, C., SHEPPARD, R.J., & GRANT, E.H. (1984) Dielectric behaviour of DNA solutions at radio and microwave frequencies (at 20 °C). *Biophys. J.*, **46**: 29-34.

TELL, R.A. (1983) Instrumentation and measurement of electromagnetic fields: Advanced Study Institute, series A. *Life Sci.*, **49**: 95-162.

TELL, R.A. (1990) RF hot spot fields: The problem of determining compliance with the ANSI radiofrequency protection guide. *NAB Engineering Conference Proceedings*, pp. 419-431.

TELL, R. A. & MANTIPLY, E. D. (1980) Population exposure to VHF and UHF broadcast radiation in the United States. *Proc. IEEE*, **68**: 6-12.

TELL, R.A., MANTIPLY, E.D., DURNEY, C.H., & MASSOUDI, H. (1982) Electric and magnetic field intensities and associated induced body currents in man in close proximity to a 50 kW AM standard broadcast station. Las Vegas, Nevada, US Environmental Protection Agency, Electromagnetic Radiation Analysis Branch, and Salt Lake City, Utah, Departments of Electrical Engineering and Bioengineering, University of Utah.

TENFORDE, T.S. & BUDINGER, T.F. (1986) Biological effects and physical safety aspects of NMR imaging and *in vivo* spectroscopy. In: Thomas, S.R. & Dixon, R.L., ed. NMR in medicine: Instrumentation and clinical applications. New York, American Association of Physicists in Medicine (Medical Monograph No. 14).

TENFORDE, T.S. & KAUNE, W.T. (1987) Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health Phys.*, **53**: 595-606.

THOMAS, J.R., YEANDLE, S.S., & BURCH, L.S. (1976) Modification of internal discriminative stimulus control of behaviour by low levels of pulsed microwave radiation. In: Johnson, C.C. & Shore, M.L., ed. Biological effects of electromagnetic waves. Selected papers of the USNC/URSI Annual Meeting, Boulder, Colorado, October 1975. Rockville, Maryland, US Department of Health, Education, and Welfare, Vol. 1, pp. 201-214 (HEW Publication (FDA) 77-8010).

THOMAS, J.R., BURCH, L.S., & YEANDLE, S.S. (1979) Microwave radiation and chlordiazepoxide: Synergistic effects on fixed-interval behaviour. *Science*, **203**: 1357-1358.

TINTINALLI, J. E., KRAUSE, G., & GURSEL, E. (1983) Microwave radiation injury. *Ann. emerg. Med.*, **12**(10): 645-647.

TOFANI, S., AGNESOD, G., OSSOLA, P., FERRINI, S., & BUSSI, R. (1986) Effects of continuous low-level exposure to radiofrequency radiation on intrauterine development in rats. *Health Phys.*, **51**: 489-499.

TOLER, J., POPOVIC, V., BONASERA, S., POPOVIC, P., HONEYCUTT, C., & SGOUTAS, D. (1988) Long-term study of 435 MHz radio-frequency radiation on blood-borne end points in cannulated rats. Part II: Methods, results, and summary. *J. microwave Power*, **23**: 105-136.

TRIBUKAIT, B., CEKAN, E., & PAULSSON, L.E. (1987) Effects of pulsed magnetic fields on embryonic development in mice. In: Knave, B. & Wideback, P.G., ed. Work with display units 86. Amsterdam, Elsevier, p. 129.

US EPA (1986) Federal radiation protection guidance; Proposed alternatives for controlling public exposure to radiofrequency radiation; Notice of proposed recommendations. *Fed. Reg.*, Part II, **51**(146): 27318-27339 (July 30, 1986).

VAN ZANDT, L.L. (1986) Resonant microwave absorption by dissolved DNA. *Phys. Rev. Lett.*, **57**: 2085-2087.

VENDRIK, A.J.H. & VOS, J.J. (1958) Comparison of the stimulation of the warmth sense organ by microwave and infrared. *J. appl. Physiol.*, **13**: 435-444.

WACHTEL, H. (1985) Synchronization of neural firing patterns by relatively weak ELF fields. In: Grandolfo, M., Michaelson, S.M., & Rindi, A. ed. Biological effects and dosimetry of static and ELF electromagnetic fields. New York, London, Plenum Press, pp.313-328.

WACHTEL, H., SEAMAN, R., & JOINES, W. (1975) Effects of low-intensity microwaves on isolated neurons. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **247**: 46-62.

WACHTEL, H., BEBIO, D., VARGAS, C., BASSEN, H., & BROWN, D. (1989) Comparison of the efficacy of pulsed versus CW microwave fields in evoking body movements. In: The Eleventh Annual International IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings.

WAY, W.I., KRITIKOS, H., & SCHWAN, H. (1981) Thermoregulatory physiologic responses in the human body exposed to microwave radiation. *Bioelectromagnetics*, **2**: 341-356.

WEAVER, J.C. & ASTUMIAN, R.D. (1990) The response of living cells to very weak electric fields: The thermal noise limit. *Science*, **247**: 459-461.

WEST, D., GLASER, Z., THOMAS, A., ALEXANDER, V., CONOVER, D., MURRAY, W., CURTIS, R., MALLINGER, S., ROBBINS, A., & BINGHAM, E. (1980) Radiofrequency (RF) heaters and sealers: potential health hazards and their prevention. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **41**: A22-A38.

WHITE, D.R.J. (1980) A handbook on electromagnetic shielding material and performance. Gainesville, Don White Consultants, p. 164.

WHO (1981) Environmental health criteria 16: Radiofrequency and microwaves. Geneva, World Health Organization, 134 pp.

WHO (1984) Environmental health criteria 35: Extremely low frequency (ELF) fields. Geneva, World Health Organization, 131 pp.

- WHO (1987) Environmental health criteria 69: Magnetic fields. Geneva, World Health Organization, 197 pp.
- WIKE, E.L. & MARTIN, E.J. (1985) Comments on Frey's "Data analysis reveals significant microwave-induced eye damage in humans". J. microwave Power electromag. Eng., 20(3): 181-184.
- WIKTOR-JEDRZEJCZAK, W., AHMED, A., CZERSKI, P., LEACH, W.M., & SELL, K.W. (1977a) Immune response of mice to 2450-MHz radiation: Overview of immunology and empirical studies of lymphoid splenic cells. Radio Sci., 12(S): 209-219.
- WIKTOR-JEDRZEJCZAK, W., AHMED, SELL, K.W., CZERSKI, P., & LEACH, W.M. (1977b) Microwaves induce an increase in the frequency of complement receptor-bearing lymphoid spleen cells in mice. J. Immunol., 118: 1499-1502.
- WIKTOR-JEDRZEJCZAK, W., AHMED, A., CZERSKI, P., LEACH, W.M., & SELL, K.W. (1980) Effect of microwaves (2450-MHz) on the immune system in mice: Studies of nucleic acid and protein synthesis. Bioelectromagnetics, 1: 161-170.
- WILLIAMS, R.J., MCKEE, A., & FINCH, E.D. (1975) Ultrastructural changes in the rabbit lens induced by microwave radiation. Ann. N.Y. Acad. Sci., 247: 166-174.
- WILLIAMS, W.M., HOSS, W., FORMANIAK, M., & MICHAELSON, S.M. (1984a) Effect of 2450 MHz microwave energy on the blood-brain barrier to hydrophilic molecules. A. Effect on the permeability to sodium fluorescein. Brain Res. Rev., 7: 165-170.
- WILLIAMS, W.M., DEL CERRO, M., & MICHAELSON, S.M. (1984b) Effect of 2450 MHz microwave energy on the blood-brain barrier to hydrophilic molecules. B. Effect on the permeability to HRP. Brain Res. Rev., 7: 171-181.
- WILLIAMS, W.M., PLATNER, J., & MICHAELSON, S.M., (1984c), Effect of 2450 MHz microwave energy on the blood-brain barrier to hydrophilic molecules. C. Effect on the permeability to (¹⁴C) sucrose. Brain Res. Rev., 7: 183-190.
- WILLIAMS, W.M., LU, S-T., DEL CERRO, M., & MICHAELSON, S.M. (1984d) Effect of 2450 MHz microwave energy on the blood-brain barrier to hydrophilic tracers. Brain Res. Rev., 7: 191-212.

- WISSLER, E.H. (1964) A mathematical model of the human thermal system. Bull. Math. Biophys. 26: 147-166.
- WISSLER, E.H. (1981) Mathematical simulation of thermoregulatory behaviour. Houston, Texas, American Society of Mechanical Engineers.
- WONG, L.S., MERRIT, J.H., & KIEL, J.L. (1985) Effects of 20-MHz radiofrequency radiation on rat haematology, splenic function, and serum chemistry. Radiat. Res., 103: 186-195.
- YANG, H.K., CAIN, C.A., LOCKWOOD, J., & TOMPKINS, W.A.F., (1983) Effects of microwave exposure on the hamster immune system. I. Natural killer cell activity. Bioelectromagnetics, 4: 123-139.
- YAO, K.T.S. (1982). Cytogenetic consequences of microwave irradiation on mammalian cells incubated *in vitro*. J. Hered., 73: 133-138.
- YEE, K-C., CHOU, C.K., & GUY, A.W. (1984) Effect of microwave radiation on the beating rate of isolated frog hearts. Bioelectromagnetics, 5: 263-270.
- YEE, K-C., CHOU, C-K., & GUY, A.W. (1988) Influence of microwaves on the beating rate of isolated rat hearts. Bioelectromagnetics, 9(2): 175-181.

RESUME ET RECOMMANDATIONS EN VUE D'ETUDES FUTURES

1 Résumé

1.1 *Propriétés physiques et effets biologiques correspondants*

Le présent document porte sur les effets biologiques des champs électromagnétiques dans la gamme de fréquence de 300 Hz à 300 GHz, gamme qui comprend les radiofréquences (RF) (100 kHz à 300 GHz), traitées dans une précédente publication (OMS, 1981). Pour simplifier, on utilise dans la suite du document l'abréviation RF pour désigner les champs électromagnétiques de fréquences comprises entre 300 Hz et 300 GHz. Ce domaine de fréquences comprend notamment les micro-ondes dont les fréquences se situent entre 300 MHz et 300 GHz.

Pour définir le niveau d'exposition à des champs électromagnétiques qui se situent dans le domaine des micro-ondes (appelées également hyperfréquences) on utilise en général la "densité de puissance" qui s'exprime normalement en watts par mètre carré (W/m^2) ou encore en milliwatts ou microwatts par mètre carré (mW/m^2 ou $\mu W/m^2$). Toutefois, à proximité des sources RF de plus grande longueur d'onde, il est nécessaire de préciser l'intensité du champ électrique (V/m) et du champ magnétique (A/m) pour décrire le champ électromagnétique.

Les conditions d'exposition peuvent être fortement modifiées par la présence d'objets, le degré de perturbation dépendant de la taille, de la forme, de l'orientation dans le champ et des propriétés électriques de ces objets. La distribution du champ résultant peut donc être très complexe tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des systèmes biologiques exposés aux champs électromagnétiques. La réfraction des ondes à l'intérieur de ces systèmes peut focaliser l'énergie transmise ce qui entraîne une hétérogénéité importante du champ et de l'énergie cédée à la matière. Des différences dans les taux d'absorption de l'énergie peuvent entraîner l'apparition de gradients thermiques générateurs d'effets biologiques locaux, difficiles à prévoir et probablement spécifiques. La géométrie et les propriétés électriques des systèmes biologiques jouent également un

rôle déterminant dans l'intensité et la répartition des courants induits à des fréquences inférieures à celles des micro-ondes.

Lorsqu'un champ électromagnétique passe d'un milieu à un autre, il peut être réfléchi, réfracté, transmis ou absorbé en fonction de sa fréquence et de la conductivité de l'objet placé dans ce champ. L'énergie RF absorbée peut être transformée en d'autres formes d'énergie et perturber le fonctionnement du système biologique. Pour l'essentiel, cette énergie est transformée en chaleur. Toutefois on ne peut pas expliquer tous les effets des champs électromagnétiques par un simple mécanisme biophysique où l'énergie est absorbée puis transformée en chaleur. On a montré qu'aux fréquences inférieures à environ 100 kHz, il y a induction de champs électriques qui peuvent stimuler les tissus nerveux. Au niveau microscopique, on pense qu'il peut y avoir d'autres interactions susceptibles de perturber les systèmes biologiques macromoléculaires complexes (membranes cellulaires, structures intracellulaires).

1.2 Sources de l'exposition

1.2.1 Collectivité

Des études approfondies menées aux Etats-Unis au sein de la collectivité afin de déterminer la valeur de fond du champ électromagnétique ambiant a fait ressortir une exposition médiane de l'ordre de $50 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Ce sont principalement les émissions de radio à haute fréquence qui sont à l'origine des champs électromagnétiques ambiants. Les enquêtes ont montré que moins de 1 % de la population était exposé à des densités de puissance dépassant $10 \text{ mW}/\text{m}^2$. A proximité immédiate des émetteurs (c'est-à-dire à une distance de l'ordre d'une demi-longueur d'onde du champ incident) l'exposition peut être plus importante et être accrue par la présence de conducteurs avoisinants. Une étude s'impose dans chaque cas particulier.

1.2.2 Environnement domestique

Dans l'environnement domestique, les sources de radiofréquences sont constituées de divers appareils: fours à micro-ondes, réchauds à induction, alarmes électroniques, installations vidéo et téléviseurs. Les fuites provenant des fours à micro-ondes peuvent atteindre 1,5

W/m^2 à 0,3 m et $0,15 \text{ W}/\text{m}^2$ à 1 m. Le meilleur moyen de limiter l'exposition au rayonnement émis par les appareils domestiques consiste à améliorer leur conception et à effectuer des contrôles à la production.

1.2.3 Lieu de travail

Sur divers lieux de travail on utilise des corps de chauffe diélectriques pour le formage du bois et le soudage des plastique, des chauffages à induction pour le travail des métaux ainsi que des installations vidéo. Les installations vidéo produisent des champs électriques et magnétiques dont la fréquence se situe entre 15 et 35 kHz ainsi que des champs modulés de très basse fréquence. Les personnels qui travaillent sur ou près des tours ou des antennes de radio-télévision peuvent être exposés à des champs importants allant respectivement jusqu'à 1 kV/m et 5 A/m. A proximité des installations de radar, les travailleurs peuvent être exposés à des densités importantes de puissance de crête s'ils se trouvent dans le faisceau de radio fréquence à quelques mètres de l'antenne émettrice (jusqu'à $10 \text{ mW}/\text{m}^2$). En général, la densité moyenne de puissance à proximité des radars de contrôle du trafic aérien est de l'ordre de $0,03\text{-}0,8 \text{ W}/\text{m}^2$.

Dans les ambiances de travail, le meilleur moyen d'assurer la protection du personnel est de s'en tenir aux spécifications d'émission relatives aux différents équipements et le cas échéant, d'assurer un contrôle continu au moyen d'instruments de mesure appropriés.

Des risques d'exposition particuliers existent en milieu médicalisé lorsqu'on utilise des appareils de diathermie pour traiter la douleur et l'inflammation des tissus. Les personnes qui manipulent ces appareils risquent une exposition professionnelle relativement importante au rayonnement parasite que l'on peut réduire au moyen d'écrans appropriés ou par une conception convenable de l'appareil. On a mesuré des champs de 300 V/m et de 1 A/m à 10 cm des électrodes. De même les chirurgiens qui utilisent du matériel électrochirurgical fonctionnant à des fréquences voisines de 27 MHz peuvent être exposés à des champs supérieurs aux limites recommandées plus haut. Ces valeurs diminuent très rapidement à mesure que s'accroît la distance aux électrodes.

La plupart des matériels utilisés pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM) utilisent des champs magnétiques statiques dont les densités de flux atteignent 2 T avec des gradients d'intensité magnétique à basse fréquence allant jusqu'à 20 T/s et des champs RF compris entre 1 et 100 MHz. La puissance délivrée au malade peut être importante mais l'exposition du personnel est beaucoup plus faible et dépend des caractéristiques de l'imageur.

1.3 Effets biologiques

Les champs électromagnétiques de fréquence comprise entre 300 Hz et 300 GHz interagissent avec les systèmes biologiques humains ou animaux soit directement soit indirectement. Les interactions indirectes sont importantes au dessous de 100 MHz mais ne correspondent qu'à des situations particulières. Lorsque des charges électriques sont induites dans des objets métalliques (comme une automobile, une grille, etc.) plongés dans un champ électromagnétique, ces objets peuvent se décharger lorsqu'un corps entre en contact avec eux. Ces décharges peuvent produire localement des densités de courant susceptibles de causer un état de choc et des brûlures.

L'un des principaux mécanismes d'interaction consiste dans l'induction de courants intratissulaires, dont les effets sont liés à la fréquence, à l'intensité et à la forme de l'onde. Pour les fréquences inférieures à environ 100 kHz, les interactions avec le tissu nerveux sont à prendre en considération du fait qu'ils sont alors plus sensibles aux courants induits. Au dessus de 100 kHz, le tissu nerveux perd de sa sensibilité à la stimulation directe par le champ électromagnétique et ce sont alors les phénomènes liés à la transformation de l'énergie électromagnétique en énergie thermique qui prédominent.

Un certain nombre d'études montrent qu'il existe également des interactions dans le cas des champs faibles. On a émis diverses hypothèses sur la nature de ces interactions mais on en ignore encore le mécanisme exact. Ces interactions avec les champs faibles résultent de l'exposition aux champs de basse fréquence modulés en amplitude.

1.4 Etudes en laboratoire

La plupart des effets biologiques observés en cas d'exposition aiguë à des champs électromagnétiques traduisent différents types de réponse au réchauffement induit: élévation de la température intratissulaire locale ou de la température centrale d'environ 1 °C ou davantage ou encore réactions destinées à réduire l'apport thermique total. La plupart de ces réactions ont été observées à des taux d'absorption spécifiques (TAS) supérieurs à environ 1-2 W/kg chez différentes espèces animales exposées dans diverses conditions d'ambiance. Les données obtenues sur l'animal (en particulier les primates) permettent de prévoir les réactions susceptibles de se produire chez des sujets humains soumis à un apport thermique suffisamment élevé. Toutefois, il est difficile d'extrapoler directement à l'homme les données quantitatives obtenues car les réactions varient généralement d'une espèce à l'autre, notamment en ce qui concerne l'aptitude thermorégulatrice.

Les réponses les plus sensibles de l'organisme animal à la charge thermique consistent dans la mise en oeuvre de mécanismes thermorégulateurs tels qu'une réduction de la thermogénèse et une vasodilatation, les valeurs seuil oscillant autour de 0,5-5 W/kg, en fonction des conditions ambiantes. Toutefois, il s'agit là de réactions qui correspondent à des réponses thermorégulatrices normales destinées à maintenir la température centrale dans des limites normales.

On a observé chez les animaux exposés des effets transitoires qui correspondent aux réactions suscitées par une augmentation de la température centrale de 1 °C ou davantage (avec des TAS dépassant environ 2 W/kg chez les primates et les rats); il s'agit d'une diminution de l'aptitude à effectuer certaines tâches après apprentissage, et d'une augmentation des taux sanguins de corticostéroïdes. Les effets thermiques peuvent également se traduire par l'apparition de réponses temporaires au niveau du système hématopoïétique et immunitaire, peut être par suite de l'élévation des taux de corticostéroïdes. Les effets les plus régulièrement observés consistent en une réduction du nombre de lymphocytes circulants, une augmentation des neutrophiles, une altération fonctionnelle des cellules NK (tueuses naturelles) et des macrophages. On a également fait état d'une augmentation de la réponse primaire en anticorps des lymphocytes B. Au niveau cardiovasculaire, les réactions observées

correspondent bien à une élévation de la charge thermique: accroissement du rythme et du débit cardiaques, avec réduction de l'effet des médicaments tels que les barbituriques dont l'action peut être modifiée par les changements au niveau circulatoire.

La plupart des données de l'expérimentation animale montrent qu'il est très peu probable que la nidation et le développement de l'embryon ou du fœtus soient affectés par une augmentation de la température centrale de la mère qui ne dépasse pas 1 °C. Au-delà, des effets indésirables tels que des retards de croissance et des modifications postnatales affectant le comportement peuvent se produire, les effets étant d'autant plus graves que la température centrale de la mère était plus élevée.

La plupart des ces mêmes données incitent à penser qu'une exposition à de faibles champs RF qui n'entraînent pas une augmentation de la température centrale au-delà des limites physiologiques, n'est pas mutagène. Une exposition de ce genre ne peut pas entraîner de mutations somatiques ou d'effets héréditaires. On est en revanche beaucoup moins bien renseigné sur les effets à long terme d'une exposition de faible intensité. Toutefois jusqu'ici, il ne semble pas qu'une exposition qui n'entraîne aucun effet thermique significatif puisse avoir d'effet à long terme. Les données obtenues sur l'animal montrent que chez les mâles, la fertilité ne devrait pas être affectée par une exposition à long terme à des intensités qui ne provoquent pas d'élévation de la température centrale ou de la température des testicules.

On n'a pas observé la formation de cataracte chez des lapins exposés pendant six mois à 100 W/m² ou des primates exposés pendant plus de trois mois à 1,5 kW/m².

On a exposé 100 rats pendant la majeure partie de leur existence à un champ électromagnétique correspondant à 0,1 W/kg, sans observer d'augmentation dans l'incidence des lésions non-néoplasiques ou de l'ensemble des lésions néoplasiques par rapport aux animaux témoins; la longévité était analogue dans les deux groupes. Il y avait certes des différences dans l'incidence globale des tumeurs malignes primitives mais elles n'étaient pas nécessairement imputables à l'irradiation.

La possibilité que l'exposition à des champs RF puisse intervenir dans le processus de la cancérogénèse est une question particulièrement préoccupante. Jusqu'ici rien n'indique de manière définitive que cet effet existe. Toutefois, il est à l'évidence nécessaire de poursuivre les études. Un grand nombre de données expérimentales montrent que ces champs n'ont pas d'effets mutagènes et que, par ailleurs, ils n'ont selon toute probabilité aucun rôle comme initiateurs de la cancérogénèse; les quelques études consacrées à ce problème ont consisté principalement à rechercher s'il y avait accroissement de l'effet exercé par tel ou tel cancérogène. Chez les souris longuement exposées à 2-8 W/kg on a observé une plus forte progression des tumeurs mammaires spontanées parmi les animaux dont la peau avait été traitée par un cancérogène chimique.

Les études *in vitro* ont révélé que, après une exposition à des champs RF à raison de 4,4 W/kg (seuls ou en association avec une irradiation X) il se produisait une augmentation du taux de transformation cellulaire après traitement par un promoteur chimique. Dans ce dernier cas, il n'y a pas toujours accord entre les différentes études. Il est cependant clair qu'il faut s'efforcer de reprendre et d'approfondir les études relatives au problème de la cancérogénèse.

On possède une somme importante de données relatives aux réponses biologiques suscitées par des champs RF modulés en amplitude ou des champs de micro-ondes à des taux d'absorption spécifiques trop faibles pour produire un effet thermique. Dans certaines de ces études, on a observé des effets lorsque le taux d'absorption spécifique était inférieur à 0,01 W/kg, effets qui se produisaient à l'intérieur de "fenêtres" de modulation de fréquence (généralement entre 1-100 Hz) et quelques fois à l'intérieur de "fenêtres" de densité de puissance; des résultats analogues ont été obtenus aux fréquences vocales (300 Hz-3 kHz). Les modifications observées concernaient les paramètres suivants: électroencéphalogramme chez le chat et le lapin, mobilité des ions calcium dans le tissu cérébral *in vitro* et *in vivo*, cytotoxicité lymphocytaire *in vitro*, activité d'une enzyme intervenant dans la croissance et la division cellulaire. Certaines de ces réponses ont été difficiles à confirmer et leur portée physiologique n'est pas clairement établie. Quoi qu'il en soit, toute étude toxicologique doit se fonder sur des épreuves menées avec une exposition d'intensité appropriée. Il importe que ces études soient confirmées et que leurs conséquences sur la santé – si elles en ont – soient dûment établies. Il serait particulièrement important de

relier les effets des très basses fréquences, des champs modulés en amplitude, des champs RF ou des champs de micro-ondes au niveau de la surface cellulaire, à des modifications intervenant dans la synthèse ou la transcription de l'ADN. Il est bon de noter que ce type d'interaction implique une "démodulation" du signal RF au niveau de la membrane cellulaire.

1.5 Etudes chez l'homme

Assez peu d'études portent directement sur les effets d'une exposition aiguë ou à long terme à des champs RF. Dans les études effectuées en laboratoire, on a observé une perception des champs au niveau cutané dans le domaine allant de 2 à 10 GHz. Le seuil d'apparition d'une sensation de chaleur se situerait à des densités de puissance de 270 W/m^2 à 2000 W/m^2 , selon la dimension de la surface irradiée (13 à 100 cm^2) et la durée de l'exposition (1 à 180 secondes). Lorsque le taux d'absorption spécifique est de 4 W/kg pendant 15 à 20 minutes, on constate chez les volontaires humains, une augmentation de la température centrale moyenne de $0,2$ à $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui est tout à fait supportable pour des sujets en bonne santé. On ignore quel impact cette charge thermique accrue pourrait avoir sur des sujets dont le système thermorégulateur est déficient et qui sont placés dans une ambiance où la thermorégulation par sudation est minimale.

Les quelques études épidémiologiques effectuées sur des populations exposées à des champs RF n'ont pas permis d'attribuer à ce type d'exposition une influence quelconque sur la santé, qu'il s'agisse d'une réduction de l'espérance de vie ou, d'une surmortalité pour une raison déterminée, sauf toutefois dans le cas des décès par cancer où l'on a noté un accroissement d'incidence qui, il est vrai, pourrait s'expliquer par une confusion avec l'action de certaines substances chimiques. Selon certaines études, ce type d'exposition n'entraînerait aucune augmentation dans l'incidence des accouchements prématurés ou des malformations congénitales alors que selon d'autres, il y aurait une association entre l'intensité de l'exposition et certains accidents obstétricaux. Ces études pèchent par un certain nombre de points, notamment une mauvaise évaluation de l'exposition et une appréciation insuffisante des autres facteurs de risque.

1.6 Evaluation des dangers pour la santé

L'évaluation globale des dangers pour la santé résultant d'une exposition aux champs de RF s'articule comme suit.

1.6.1 Effets thermiques

Lorsque de l'énergie électromagnétique est absorbée par le corps humain elle tend à accroître la température centrale. Dans ces conditions, la thermogénèse métabolique peut atteindre 3 à 5 W/kg . Dans une ambiance thermique normale, un taux d'absorption spécifique de 1 à 4 W/kg pendant 30 minutes ne produit qu'une augmentation moyenne de la température centrale inférieure à $1 \text{ }^\circ\text{C}$ chez un adulte en bonne santé. Par conséquent, une valeur indicative d'exposition professionnelle aux champs RF correspondant à un taux d'absorption spécifique de $0,4 \text{ W/kg}$, laisse une marge de sécurité qui permet de se garantir contre les complications qui peuvent se produire dans une ambiance thermique défavorable. En ce qui concerne la population en général, au sein de laquelle peuvent se trouver des groupes plus sensibles tels que les nourrissons et les personnes âgées, un taux d'absorption spécifique de $0,08 \text{ W/kg}$ donne une marge supplémentaire de sécurité et garantit contre les effets thermiques indésirables des champs RF.

1.6.2 Champs pulsés

On a montré, dans un certain nombre de circonstances que le seuil d'apparition des effets biologiques aux fréquences supérieures à plusieurs centaines de MHz diminuait lorsque l'énergie était délivrée sous la forme de brèves impulsions (1 à $10 \text{ } \mu\text{s}$). Par exemple, l'émission d'un train d'impulsions délivrant plus de 400 mJ/m^2 chacune durant moins de $30 \text{ } \mu\text{s}$ produit des effets auditifs. Il n'est pas possible de définir une limite de sécurité pour ces trains d'impulsions sur la base des données disponibles.

1.6.3 Champs RF modulés en amplitude

Les effets de ce type de champ observés au niveau cellulaire, tissulaire et organique ne semblent pas correspondre à des effets nocifs pour la santé. Comme il n'est pas possible d'établir de relation dose-effet qui mette en évidence un seuil quelconque, on

n'est en mesure d'émettre des recommandations particulières en fonction des données disponibles.

1.6.4 Effets des champs RF sur l'induction et la promotion des tumeurs

Il n'est pas possible d'après ce que l'on sait des effets que les champs RF exercent sur certaines lignées cellulaires, sur la transformation des cellules, sur l'activité enzymatique ainsi que sur l'incidence et la progression des tumeurs chez l'animal, de conclure que l'exposition à ces champs puisse avoir un effet quelconque sur l'incidence du cancer chez l'homme ni d'en déduire que des recommandations particulières seraient nécessaires pour limiter l'intensité de ces champs en raison du risque de cancer.

1.6.5 Densités de courant induites par les champs RF

Dans la gamme de fréquence de 300 Hz à 100 kHz, le paramètre le plus important pour l'évaluation du risque est l'induction de champs et de courants dans les tissus excitables. Le seuil de stimulation du tissu nerveux et musculaire dépend fortement de la fréquence et la densité de courant nécessaire varie de 0,1 à 1 mA/m² à 300 Hz à environ 10-100 A/m² à 100 kHz. Toutefois, pour ce qui concerne les autres effets observés en-dessous de ces seuils, on ne dispose pas de données suffisantes pour émettre des recommandations particulières.

1.6.6 Chocs et brûlures provoqués par contact avec des objets plongés dans un champ RF

Les objets conducteurs plongés dans un champ RF peuvent acquérir une charge électrique. Lorsqu'une personne touche un tel objet ou s'en approche suffisamment près, un courant électrique non négligeable peut s'établir entre l'objet et la personne. En fonction de la fréquence, de l'intensité du champ électrique, de la taille et de la forme de l'objet ainsi que de l'aire des surfaces en contact, le courant résultant peut provoquer un choc par stimulation des nerfs périphériques. Si le courant est suffisamment fort, il peut entraîner des brûlures. A titre de précaution, on peut éliminer tout objet conducteur présent dans un champ intense de RF, le placer dans une enceinte ou en limiter l'accès.

1.7 Normes d'exposition

1.7.1 Limites de base

Afin de protéger les travailleurs et la population générale contre les effets éventuels d'une exposition aux champs électromagnétiques, on a défini des limites de base qui s'appuient sur les effets biologiques observés. Diverses considérations scientifiques sont à la base des limites fixées pour les fréquences supérieures ou inférieures à MHz. Au-dessus de 1 MHz, on a étudié les effets biologiques sur l'animal afin de déterminer quelle est la valeur la plus faible du taux d'absorption spécifique moyen pour le corps entier qui est susceptible d'avoir un effet nocif sur la santé. Cette valeur est de 3 à 4 W/kg.

La majeure partie des résultats concerne des expositions à des champs qui se situent à la limite inférieure du domaine gigahertzien. Ainsi, pour déterminer les effets qui s'exercent à fréquences plus basses, il faut poser par hypothèse que les effets biologiques sont liés à la fréquence. Etant donné que les effets biologiques observés dans les limites de 1 à 4 W/kg sont supposées être thermiques, on suppose que la valeur seuil du taux d'absorption spécifique est indépendante de la fréquence. On estime que l'exposition d'un être humain à 4 W/kg pendant 30 minutes entraîne une augmentation de moins de 1°C de la température centrale. Cet accroissement de la température centrale est considéré comme acceptable.

Afin de tenir compte des effets défavorables, des effets thermiques et des effets d'ambiance ou des effets éventuels à long terme, on a introduit un coefficient de sécurité de 10, d'où une limite de base égale à 0,4 W/kg. En ce qui concerne la population en général, il faudrait introduire une marge de sécurité supplémentaire pour tenir compte des sujets qui sont plus ou moins sensibles à l'exposition. En général pour le grand public, on propose un coefficient de sécurité de 5 ce qui entraîne une limite de base de 0,08 W/kg. On trouvera aux tableaux 34 et 35 de la présente publication les limites d'exposition qui en dérivent.

Les limites relatives au taux d'absorption spécifique moyen pour le corps entier ne sont pas suffisamment restrictives, étant donné que la distribution de l'énergie absorbée dans l'organisme peut être hétérogène et liée aux conditions d'exposition. En cas d'exposition partielle du corps et en fonction de la fréquence, l'énergie absorbée

peut se concentrer dans un volume limité de tissu, même si le taux d'absorption spécifique moyen pour le corps entier est inférieur à 0,4 W/kg. Par conséquent, il est recommandé d'observer une limite de base supplémentaire de 2 W/100 g pour toute zone délimitée de l'organisme afin d'éviter une élévation excessive de la température locale. L'oeil constitue un cas à part.

Aux fréquences inférieures à environ 1 MHz, les limites d'exposition ont été choisies pour éviter une stimulation des cellules nerveuses et musculaires. Les limites d'exposition concernent les densités de courant induites dans les tissus. Elles doivent comporter un coefficient de sécurité suffisant pour limiter la densité de courant à 10 mA/m² à 300 Hz. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle des courants naturels de l'organisme. Au-dessus de 300 Hz, la densité de courant nécessaire à l'excitation du tissu nerveux croît avec la fréquence jusqu'à ce que les effets thermiques prennent le relais. Aux fréquences situées alentour de 2 à 2 Mhz, la limite de base pour la densité de courant correspond à la limite relative au taux d'absorption spécifique maximal de 1 W/100 g. Etant donné qu'il est difficile, en pratique, de mesurer un taux d'absorption spécifique ou une densité de courant, on s'efforce d'obtenir, à partir des limites de base, des limites d'exposition qui s'expriment sous la forme d'une grandeur aisément mesurable. Ces limites "dérivées" permettent de savoir quelles sont les limites à fixer aux paramètres mesurés ou calculés du champ pour satisfaire aux limites de base.

1.7.2 Limites d'exposition professionnelle

Les populations exposées de par leur profession sont constituées d'adultes exposés dans des conditions contrôlées et qui sont conscients des risques qu'ils encourent. Etant donné la gamme étendue de fréquences qui fait l'objet de la présente publication, il n'est pas possible de donner une valeur unique pour l'exposition professionnelle. On trouvera au tableau 34 une liste des limites professionnelles dérivées pour les fréquences de 100 kHz à 300 GHz. Dans le cas des champs pulsés, la prudence est recommandée et l'intensité des champs électriques et magnétiques est limitée à 32 fois les valeurs du tableau 34 (en moyenne calculée sur une largeur d'impulsion). Quant à la densité de puissance, elle est limitée à 1000 fois la valeur correspondante du tableau 34 ramenée à sa moyenne sur la largeur d'une impulsion.

1.7.3 Limites d'exposition pour la population générale

La population générale est constituée de personnes d'âge différente, d'état de santé variable et de femmes enceintes. L'éventualité d'une sensibilité particulière du fœtus mérite une attention spéciale.

Les limites d'exposition pour la population générale devraient être inférieures aux limites d'exposition professionnelle. Par exemple, les limites dérivées recommandées pour les fréquences de 100 kHz à 300 GHz (tableau 35), sont généralement inférieures d'un facteur 5 aux limites d'exposition professionnelle.

1.7.4 Application des normes

Pour faire appliquer les normes d'exposition professionnelle ou celle qui concernent la santé publique, il faut préciser qui est chargé de mesurer les champs, d'interpréter les résultats et d'établir les codes de sécurité détaillés correspondantes ou des manuels d'hygiène et de sécurité qui indiquent le cas échéant comment procéder pour réduire l'exposition.

1.8 Mesures de protection

Au nombre des mesures de protection figurent la surveillance du lieu de travail (enquêtes), les contrôles techniques, les mesures administratives, la protection individuelle et la surveillance médicale. Lorsque les enquêtes indiquent que l'exposition sur le lieu de travail dépasse les limites recommandées pour la population générale, il faut mettre en place une surveillance. Si ces mêmes enquêtes indiquent que l'exposition sur les lieux de travail dépasse les limites recommandées, on prendra des mesures pour protéger les travailleurs. Il faut, en premier lieu, prendre des mesures techniques qui ramènent les émissions à un niveau acceptable. Ces mesures consistent tout d'abord en une conception générale respectueuse de l'hygiène et de la sécurité et, si nécessaire, dans l'utilisation de dispositifs de verrouillage ou autres types de sécurités.

Sur le plan administratif, on peut prendre des mesures visant à limiter l'accès à l'appareillage, et faire utiliser des systèmes d'alarme sonores ou visuels, en plus des mesures techniques. En ce qui concerne les mesures de protection individuelle (port de vêtements

protecteurs), si elles peuvent rendre des services dans certains cas, on doit considérer qu'elles ne constituent qu'un recours ultime. Dans la mesure du possible on privilégiera les mesures techniques et administratives. Lorsque les travailleurs risquent de subir une exposition dépassant les limites applicables à la population générale, on envisagera de les soumettre à une surveillance médicale appropriée.

La prévention des risques liés à l'utilisation des champs RF nécessite également l'établissement et le respect d'un certain nombre de règles: *a)* veiller à ce qu'il n'y ait pas d'interférences avec les dispositifs de sécurité et les appareils médicaux électroniques (par exemple les stimulateurs cardiaques); *b)* veiller à éviter le déclenchement des détonateurs à commande électronique; et enfin *c)* prendre des mesures contre les incendies et les explosions dus à la présence de matériaux qui pourraient s'enflammer au contact des étincelles produites par des champs induits.

2 Recommandations en vue de recherches futures

2.1 Introduction

On s'inquiète d'un certain nombre d'effets que les champs RF pourraient avoir sur la santé: promotion et progression des tumeurs cancéreuses, effets indésirables sur la fonction de reproduction (avortements spontanés et malformations congénitales), et effets sur le fonctionnement du système nerveux central. Les connaissances dans tous ces domaines restent trop fragmentaires pour que l'on puisse se prononcer sur l'existence de ces effets, aussi ne dispose-t-on d'aucune base rationnelle pour proposer des recommandations visant à protéger la population générale contre d'éventuels effets nocifs.

Il faudrait assurer une très bonne coordination des efforts de recherche concernant les interactions faibles avec les processus biologiques d'une part et les études consacrées aux effets sur la cancérogénèse et la fonction de reproduction chez l'animal et chez l'homme d'autre part. Ce type de coordination pourrait être assuré en favorisant le financement de propositions de recherches pluri-disciplinaires ou pluri-institutionnelles. Les études consacrées aux champs RF pourraient être coordonnées avec les programmes du même type consacrés aux effets des champs de très basse fréquence (50 à 60 Hz). On devrait accorder une priorité élevée aux recherches

qui portent principalement sur l'établissement de relations causales et sur les effets de seuil.

De l'avis du Groupe de travail, les secteurs suivants doivent être considérés comme prioritaires.

2.2 Champs pulsés

Nos connaissances sont très insuffisantes au sujet des effets produits par de très fortes densités de puissance de crête séparées par des périodes où la puissance est nulle. On ne dispose que de quelques rapports isolés sur les effets des champs pulsés et il n'est pas possible de déterminer si c'est la fréquence ou la puissance de crête qui est la plus importante. Il est d'une nécessité urgente de disposer de données concernant les risques pour la santé humaine liés à des facteurs tels que la puissance de crête du champ pulsé, la fréquence de répétition, la longueur des impulsions et la fréquence du champ, du fait des applications de plus en plus larges de systèmes utilisant des impulsions de grande puissance (essentiellement des radars), systèmes qui entraînent une exposition professionnelle et une exposition de la population générale.

2.3 Etudes sur les cancers, la fonction de reproduction et le système nerveux

On s'inquiète de plus en plus du rôle que l'exposition aux champs RF pourrait avoir dans l'apparition ou la promotion de certains cancers, notamment au niveau des organes hématopoïétiques ou du système nerveux central. Il existe des incertitudes du même genre à propos d'effets possibles sur la reproduction, par exemple un accroissement des avortements spontanés et des malformations congénitales.

Les effets d'une exposition aux champs RF sur le système nerveux central et notamment sur les fonctions cognitives, sont également entachés d'incertitude. En raison de l'importance potentielle de ces interactions et compte tenu de l'influence néfaste que le flou qui les entoure pourrait avoir sur le corps social, il importe de considérer ce secteur comme tout à fait prioritaire. Il faudrait que les efforts de recherche soient coordonnés afin de lever toutes ces incertitudes au lieu de les accroître. On s'efforcera de coordonner étroitement les recherches sur les mécanismes à la base

de ces effets, notamment l'action des champs faibles, avec des études toxicologiques bien conçues sur l'animal et des études épidémiologiques chez l'homme.

2.4 Interactions avec les champs faibles

Très peu de personnes sont exposées à des champs RF qui suscitent des effets thermiques importants; dans la très grande majorité des cas, le niveau d'exposition susceptible d'entraîner des effets nocifs sur la santé n'implique que des interactions avec des champs faibles. On possède un nombre important de données expérimentales qui indiquent l'existence de réactions aux champs de RF modulés en amplitude, données qui font ressortir l'existence de fenêtres de fréquence et d'amplitude; certaines réactions sont liées à une exposition concomitante à des agents physiques ou chimiques. Il est d'une importance capitale d'établir la portée de ces effets pour la santé humaine et de déterminer les relations dose-réponse qui peuvent exister. Des travaux sont nécessaires afin d'identifier les mécanismes biophysiques qui sous-tendent ces interactions en les étendant à l'expérimentation animale et humaine afin de mettre en évidence les risques éventuels pour la santé.

2.5 Epidémiologie

Les études épidémiologiques sur la responsabilité éventuelle des champs RF dans certains cancers et accidents obstétricaux sont rendues difficiles par un certain nombre de facteurs:

- Pour la plupart des membres de la population, l'exposition aux champs RF est de plusieurs ordres de grandeur inférieure aux valeurs qui produiraient des effets thermiques sensibles.
- Il est très difficile d'établir qu'elle est l'exposition subie par des individus sur une période de temps représentative.
- Il est très difficile de tenir compte des principaux facteurs de confusion.

Moyennant des études cas-témoins convenablement conçues et menées, il est possible de surmonter ces difficultés, du moins en partie. Un certain nombre d'études de ce genre sont en cours ou en

prévision pour ce qui concerne les cancers de l'enfance et les effets éventuels des champs électriques de basse fréquence. Il est important de prévoir dans ces études, une évaluation de l'exposition aux champs RF.

RESUMEN Y RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS ULTERIORES

1. Resumen

1.1 Características físicas en relación con los efectos biológicos

El presente documento se ocupa de los efectos que tienen en la salud los campos electromagnéticos de la banda de frecuencias comprendidas entre 300 Hz y 300 GHz, que abarca el espectro de radiofrecuencias (RF) (100 kHz-300 GHz) tratado en la publicación anterior (OMS, 1981). Para mayor sencillez, en el presente documento se utiliza la abreviatura RF para los campos electromagnéticos de frecuencia 300 Hz-300 GHz. Dentro de esas frecuencias se encuentran las microondas, cuyas frecuencias están comprendidas entre 300 MHz y 300 GHz.

Los niveles de exposición en la gama de microondas suelen describirse respecto de la «densidad de potencia» y suelen expresarse en vatios por metro cuadrado (W/m^2), o milivatios o microvatios por metro cuadrado (mW/m^2 , $\mu\text{W/m}^2$). Sin embargo, en las proximidades de fuentes de RF con longitudes de onda superiores, se necesitan para describir el campo los valores de intensidades de los campos eléctrico (V/m) y magnético (A/m).

Las condiciones de exposición pueden verse considerablemente alteradas por la presencia de objetos; el grado de perturbación depende de su tamaño, forma, orientación en el campo, y propiedades eléctricas. Pueden producirse distribuciones sumamente complejas del campo, tanto dentro como fuera de los sistemas biológicos expuestos a campos electromagnéticos. La refracción dentro de estos sistemas puede centrar la energía transmitida, dando lugar a campos notablemente heterogéneos y a deposición de energía. Los distintos índices de absorción energética pueden originar gradientes térmicos causantes de efectos biológicos que pueden ser generados localmente, difíciles de prever y tal vez singulares. La geometría y las propiedades eléctricas de los sistemas biológicos serán también factores que determinen la magnitud y la distribución de corrientes inducidas en frecuencias inferiores a la banda de microondas.

Cuando los campos electromagnéticos pasan de un medio a otro, pueden ser reflejados, refractados, transmitidos o absorbidos, atendiendo a la conductividad del objeto expuesto y a la frecuencia del campo. La energía RF absorbida puede convertirse en otras formas de energía y causar interferencias con el funcionamiento del sistema vivo. La mayor parte de esta energía se convierte en calor. No obstante, no todos los efectos de los campos electromagnéticos pueden explicarse basándose en los mecanismos biofísicos de la absorción energética y la conversión térmica. En frecuencias inferiores a unos 100 kHz, se ha demostrado que los campos eléctricos inducidos pueden estimular el sistema nervioso. A escala microscópica, se han postulado otras interacciones causantes de perturbaciones en los sistemas biológicos macromoleculares complejos (membranas celulares, estructuras subcelulares).

1.2 Fuentes y exposición

1.2.1 Comunidad

En estudios comunitarios amplios sobre los niveles de fondo de los campos electromagnéticos en los Estados Unidos, se encontró una exposición mediana del orden de $50 \mu\text{W/m}^2$. Se observó que los principales contribuyentes a los campos electromagnéticos del ambiente eran las radiodifusiones de frecuencias muy altas. Menos del 1% de la población estaba expuesta a densidades ambiente superiores a 10 mW/m^2 . La exposición en las proximidades inmediatas (a una distancia de aproximadamente media longitud de onda de los campos incidentes) de estaciones transmisoras puede ser superior, y verse aumentada por objetos próximos con carácter conductor. Esas condiciones deben evaluarse para cada situación concreta.

1.2.2 Hogar

Entre las fuentes de RF en el hogar figuran los hornos de microondas, las cocinas que calientan por inducción, las alarmas antirrobo, las pantallas de computadora y los receptores de televisión. Los escapes a partir de hornos de microondas pueden elevarse hasta $1,5 \text{ W/m}^2$ a 0,3 m y $0,15 \text{ W/m}^2$ a una distancia de 1 metro. La mejor manera de limitar la exposición a las radiaciones procedentes de electrodomésticos es cuidar su diseño y vigilar los escapes en el punto de fabricación.

1.2.3 Lugar de trabajo

Los calentadores dieléctricos para el tratamiento de madera y el sellado de plásticos, los calentadores por inducción para calentar metales, y las pantallas de computadora tienen un uso sumamente extendido en distintas situaciones ocupacionales. Las pantallas de computadora crean campos eléctricos y magnéticos en las frecuencias comprendidas en la banda 15-35 kHz y las frecuencias moduladas en la banda ELF. El personal que trabaja en el interior o en las proximidades de torres o antenas emisoras pueden verse expuestos a campos de intensidad considerable, de hasta 1 kV/m y 5 A/m, respectivamente. En las cercanías de instalaciones de radar, los trabajadores pueden estar expuestos a máximos considerables de densidad de potencia si se encuentran en el rayo de RF a pocos metros de las antenas de radar (hasta decenas de MW/m²). Por lo general, la densidad de potencia media en las proximidades de los radares que controlan el tráfico aéreo, por ejemplo, se encuentra en el orden de 0,03-0,8 W/m².

En el medio laboral, la mejor manera de proteger a los trabajadores es respetar las especificaciones de emisión en todos y cada uno de los elementos del equipo y, cuando sea necesario, el monitoreo y la vigilancia utilizando los aparatos apropiados.

Se produce un caso especial de exposición en el entorno médico con el uso de tratamientos diatérmicos contra el dolor y la inflamación en tejidos orgánicos. Los operarios de estos aparatos están probablemente expuestos a niveles relativamente elevados de radiación dispersa, que pueden reducirse mediante vestimenta protectora adecuada o por el diseño de la máquina. Se han llegado a medir intensidades de campo de 300 V/m y 1 A/m a 10 cm de los aplicadores. Del mismo modo, los cirujanos que utilizan instrumentos electroquirúrgicos que funcionan a frecuencias próximas a 27 MHz pueden verse expuestos a niveles superiores a los límites recomendados. Estas intensidades de campo disminuyen muy rápidamente al aumentar la distancia desde los aplicadores.

La mayoría de los sistemas de imagen por resonancia magnética utilizan campos magnéticos estáticos con densidades de flujo de hasta 2 T, campos de gradiente de baja frecuencia de hasta 20 T/s, y campos de RF en la banda de frecuencias de 1 a 100 MHz.

Aunque la deposición de potencia en el paciente puede ser considerable, la exposición del personal es mucho menor y viene determinada por las características del equipo.

1.3 Efectos biológicos

Los campos electromagnéticos en la banda de frecuencias de 300 Hz-300 GHz interactúan con los sistemas humanos y otros sistemas animales por vías directas e indirectas. Las interacciones indirectas son importantes en frecuencias inferiores a 100 MHz, pero se producen en situaciones particulares. Cuando un objeto metálico (como un automóvil, una valla) que se encuentra en un campo electromagnético adquiere carga eléctrica por inducción, puede descargarse al entrar un cuerpo en contacto con él. Esas descargas pueden originar densidades de corriente locales capaces de provocar un choque o quemaduras.

Uno de los principales mecanismos de interacción es mediante las corrientes inducidas en los tejidos, de modo que los efectos dependen de la frecuencia, la forma de las ondas y la intensidad. Con frecuencias inferiores a unos 100 kHz, revisten interés las interacciones con el tejido nervioso, debido a su mayor sensibilidad a las corrientes inducidas. Por encima de 100 kHz, el tejido nervioso se hace menos sensible al estímulo directo por campos electromagnéticos y la termalización de la energía se convierte en el principal mecanismo de interacción.

Se ha observado en varios estudios que también existen interacciones por campos débiles. Se han postulado diferentes mecanismos para esas interacciones, pero no se ha elucidado el mecanismo preciso. Esas interacciones de campos débiles se deben a la exposición a campos de RF, de amplitud modulada a frecuencias inferiores.

1.4 Estudios en el laboratorio

Muchos de los efectos biológicos de la exposición aguda a campos electromagnéticos son coherentes con las respuestas al calentamiento inducido, y dan lugar a elevaciones de la temperatura de los tejidos o el cuerpo de alrededor de 1 °C o más, o a respuestas encaminadas a reducir la carga térmica total. La mayoría de las respuestas se han notificado a índices de absorción específica (IAE)

superiores a unos 1-2 W/kg en distintas especies animales expuestas bajo diversas condiciones ambientales. Los datos obtenidos en animales (especialmente primates) indican los tipos de respuestas probables en humanos sometidos a una carga térmica suficiente. No obstante, la extrapolación cuantitativa directa al ser humano es difícil, dadas las diferencias entre unas especies y otras en las respuestas en general y en la capacidad termorreguladora en particular.

Las respuestas animales más sensibles a la carga térmica son las adaptaciones termorreguladoras, como la reducción de la producción térmica en el metabolismo y la vasodilatación, con umbrales entre 0,5 y 5 W/kg, según las condiciones ambientales. No obstante, esas reacciones forman parte del repertorio natural de respuestas termorreguladoras que sirven para mantener la temperatura normal.

Entre los efectos transitorios observados en animales expuestos, que son acordes con las respuestas a aumentos de la temperatura corporal de 1 °C o más (y/o IAE superiores a unos 2 W/kg en primates y ratas), figuran el menor rendimiento en la ejecución de tareas aprendidas y el aumento de los niveles plasmáticos de corticosteroides. Entre otros efectos relacionados con el calor figuran respuestas hematopoyéticas e inmunitarias temporales, debidas posiblemente al aumento de los niveles de corticosteroides. Los efectos más uniformemente observados son la reducción de los niveles de linfocitos circulantes, el aumento de los niveles de neutrófilos, y la alteración de la función natural de las células asesinas y los macrófagos. También se ha comunicado un aumento de la respuesta primaria con anticuerpos de los linfocitos B. Se han observado alteraciones cardiovasculares coherentes con el aumento de la carga térmica, como la aceleración del ritmo cardíaco y la mayor producción cardíaca, junto con una reducción del efecto de ciertos fármacos, como los barbitúricos, cuya acción puede verse modificada por los cambios circulatorios.

La mayoría de los datos en animales indican que la implantación y el desarrollo del embrión y el feto probablemente no se vean afectados por exposiciones que aumenten la temperatura del cuerpo materno en menos de 1 °C. Por encima de estas temperaturas pueden presentarse efectos adversos, como retraso del crecimiento y cambios conductuales postnatales, con efectos más graves cuanto mayor es la temperatura de la madre.

La mayoría de los datos en animales sugieren que las exposiciones bajas a RF que no aumentan la temperatura corporal por encima del margen fisiológico no son mutagénicas: esas exposiciones no darán lugar a mutaciones somáticas ni a efectos hereditarios. Se dispone de mucha menos información que describa los efectos de exposiciones de bajo nivel a largo plazo. No obstante, hasta el momento, no parece que la exposición a niveles inferiores a los térmicamente significativos produzca efectos a largo plazo. Los datos en animales indican que la fecundidad de los machos no se ve afectada por la exposición prolongada a niveles insuficientes para elevar la temperatura del cuerpo y de los testículos.

No se indujo catarata en conejos expuestos a 100 W/m² durante 6 meses, ni en primates expuestos a 1,5 kW/m² durante más de 3 meses.

En un estudio realizado en 100 ratas expuestas durante casi toda su vida a unos 0,4 W/kg no se observó aumento de la incidencia de lesiones no neoplásicas ni de neoplasias totales en comparación con los animales testigo; la longevidad fue similar en ambos grupos. Se observaron diferencias en la incidencia general de tumores malignos primarios pero no pudieron atribuirse necesariamente a la irradiación.

La posibilidad de que la exposición a campos de RF pueda influir en el proceso de la carcinogénesis es motivo de particular inquietud. Hasta el momento no hay pruebas concluyentes de que la irradiación ejerza efecto alguno, pero es a todas luces necesario llevar a cabo más estudios. Muchos datos experimentales indican que los campos de RF no son mutagénicos, y por ello es poco probable que actúen como desencadenantes de carcinogénesis; en los pocos estudios realizados, se han buscado sobre todo pruebas de un aumento del efecto de un carcinógeno conocido. La exposición prolongada de ratones a 2-8 W/kg dio lugar a un aumento de la progresión de tumores espontáneos de la mama y de tumores cutáneos en animales tratados con un carcinógeno químico por vía cutánea.

Los estudios *in vitro* han revelado índices mayores de transformación celular tras la exposición a RF de 4,4 W/kg (por sí sola o combinada con rayos X) seguida por un tratamiento con un promotor químico. Los últimos datos no siempre han sido uniformes de unos estudios a otros. Está claro, no obstante, que es necesario reproducir y profundizar los estudios sobre la carcinogénesis.

Se dispone de un gran volumen de información que describe las respuestas biológicas a RF de amplitud modulada o campos de microondas con IAE demasiado bajos para desencadenar respuestas al calentamiento. En algunos estudios, se han notificado efectos tras la exposición a IAE inferiores a 0,01 W/kg, que han aparecido dentro de «ventanas» de frecuencia de modulación (generalmente entre 1 y 100 Hz) y a veces dentro de «ventanas» de densidad de potencia; se han comunicado resultados similares con frecuencias dentro del espectro de la voz humana (VF) (300 Hz–3 kHz). Se han notificado cambios en: los electroencefalogramas de gatos y conejos; la movilidad del ion calcio en el tejido cerebral *in vitro* e *in vivo*; la citotoxicidad de los linfocitos *in vitro*; y la actividad de una enzima que participa en el crecimiento y la división celular. Algunas de estas respuestas han resultado difíciles de confirmar, y sus consecuencias fisiológicas no están claras. No obstante, toda investigación toxicológica que se emprenda debe basarse en ensayos llevados a cabo con niveles de exposición apropiados. Importa que esos estudios se confirmen y que se determinen, si existen, las repercusiones para la salud de las personas expuestas. Sería particularmente importante realizar estudios que vinculen las interacciones de frecuencias extremadamente bajas, modulación de amplitud, RF o microondas en la superficie celular con los cambios en la síntesis o la transcripción del ADN. Cabe destacar que esta interacción entraña una «desmodulación» de la señal de RF en la membrana celular.

1.5 Estudios en el ser humano

Existen relativamente pocos estudios que se ocupen directamente de los efectos de la exposición aguda o prolongada del ser humano a los campos de RF. En estudios realizados en el laboratorio, se ha notificado percepción cutánea de campos en la banda 2–10 GHz. Se han fijado umbrales para sensibilidad al calor con densidades de potencia de 270 W/m² – 2000 W/m², según la superficie irradiada (13–100 cm²) y la duración de la exposición (1–180 s). Cuando se expone a voluntarios humanos a IAE de 4 W/kg durante 15–20 minutos, la temperatura corporal media asciende 0,2–0,5 °C, que resulta totalmente admisible en personas sanas. Se desconoce el efecto que esta carga térmica añadida tendría en individuos que padecen trastornos en la termorregulación en ambientes que reducen al mínimo los mecanismos de enfriamiento basados en la transpiración.

Los pocos estudios epidemiológicos que se han llevado a cabo en poblaciones expuestas a campos de RF no han permitido establecer asociaciones significativas entre esas exposiciones y resultados como disminución de la longevidad o excesos en causas particulares de defunción, salvo una mayor incidencia de muerte por cáncer, en la que la exposición a sustancias químicas puede haber sido un factor de confusión. En algunos estudios, no se observó aumento de la incidencia de partos prematuros ni malformaciones congénitas, si bien otros estudios indicaron que existía una asociación entre el nivel de exposición y el resultado adverso del embarazo. Esos estudios suelen adolecer de una mediocre evaluación de la exposición y una deficiente identificación y determinación de otros factores de riesgo.

1.6 Evaluación de riesgos para la salud

En una evaluación general de los riesgos para la salud asociados a las exposiciones a RF se han definido las siguientes categorías de riesgo para la salud:

1.6.1 Efectos térmicos

La deposición de energía RF en el organismo humano tiende a aumentar la temperatura corporal. Durante el ejercicio, la producción de calor metabólico puede alcanzar niveles de 3–5 W/kg. En entornos térmicos normales, un IAE de 1–4 W/kg durante 30 minutos produce aumentos medios de la temperatura corporal inferiores a 1 °C en adultos sanos. Así, una norma ocupacional de RF de 0,4 W/kg IAE deja un margen de protección contra complicaciones debidas a condiciones ambientales térmicamente desfavorables. Para la población general, que comprende las subpoblaciones sensibles como los lactantes y los ancianos, un IAE de 0,08 W/kg daría un margen adicional de seguridad contra los efectos térmicos adversos de los campos RF.

1.6.2 Campos pulsátiles

Se ha demostrado, en diversas condiciones, que los umbrales para la aparición de efectos biológicos en frecuencias superiores a varios cientos de MHz disminuyen cuando la energía se libera en pulsos cortos (1–10 µs). Por ejemplo, se producen efectos auditivos cuando en pulsos de menos de 30 µs de duración se liberan más de

400 mJ/m² por pulso. Con arreglo a las pruebas disponibles, no puede definirse un límite inocuo para esos pulsos.

1.6.3 Campos RF de amplitud modulada

Los efectos descritos para este tipo de campo en los niveles celular, tisular y orgánico no pueden relacionarse con efectos adversos para la salud. No pueden formularse relaciones dosis-efecto en las que se observen niveles umbral; así, con la información disponible no pueden formularse recomendaciones específicas.

1.6.4 Efectos de los campos RF en la inducción y la promoción de tumores

A partir de los informes sobre los efectos de la exposición a RF en ciertas líneas celulares, en la transformación celular, en la actividad enzimática y en la incidencia y la progresión de tumores en animales, no es posible concluir que la exposición a RF tenga efecto alguno en la incidencia del cáncer en el ser humano ni que sean necesarias recomendaciones específicas para limitar esos campos a fin de reducir los riesgos de cáncer.

1.6.5 Densidades de corrientes inducidas por RF

En la banda de frecuencias de 300 Hz-100 kHz, la inducción de campos y densidades de corriente en tejidos excitables es el mecanismo más importante para evaluar los riesgos. Los umbrales de estimulación de tejido nervioso y muscular dependen en gran medida de la frecuencia, y van desde 0,1-1 mA/m² a 300 Hz hasta unos 10-100 A/m² a 100 kHz. No obstante, en lo que se refiere a otros efectos, observados por debajo de esos umbrales, no se dispone de bastante información para formular recomendaciones específicas.

1.6.6 Choques y quemaduras por contacto en campos RF

En un campo de RF, los objetos conductores pueden adquirir carga eléctrica. Cuando una persona toca un objeto cargado o se acerca mucho a él, puede producirse una corriente de importancia entre el objeto y esa persona. Según la frecuencia, la intensidad del campo eléctrico, la forma y el tamaño del objeto, y la superficie de contacto, la corriente resultante puede provocar un choque por

estimulación de los nervios periféricos. Si la corriente tiene bastante intensidad, pueden producirse quemaduras. Como medida de protección deben eliminarse o aislarse los objetos conductores que se encuentren en campos intensos de RF, o limitarse el acceso físico.

1.7 Normas de exposición

1.7.1 Límites básicos de exposición

Para proteger a los trabajadores y a la población general de los posibles efectos en la salud que tiene la exposición a los campos electromagnéticos, se han determinado límites básicos de exposición basándose en el conocimiento de sus efectos biológicos. Se utilizaron distintas bases científicas para fijar los límites correspondientes a frecuencias superiores e inferiores a aproximadamente 1 MHz. Por encima de 1 MHz, se estudiaron los efectos biológicos en animales para determinar el menor valor del IAE medio para el organismo entero que provocaba efectos nocivos en los animales. Se encontró que ese valor estaba comprendido entre 3 y 4 W/kg.

La gran mayoría de los resultados correspondían a las exposiciones en la región inferior de GHz. Así, para determinar los efectos a frecuencias más bajas es necesario suponer una cierta dependencia de la frecuencia en la respuesta biológica. Como se cree que los bioefectos observados en la banda 1-4 W/kg son de carácter térmico, se supuso que el umbral para el IAE era independiente de la frecuencia. Se consideró que la exposición del ser humano a 4 W/kg durante 30 minutos daría lugar a un ascenso de la temperatura corporal inferior a 1 °C. Este aumento de la temperatura corporal se considera aceptable.

Para dar cabida a posibles efectos desfavorables, térmicos, ambientales y a largo plazo, así como a otras variables, se ha introducido un factor de seguridad de 10, con lo que se obtiene un límite básico de 0,4 W/kg. Debería introducirse un factor de seguridad adicional para la población general, que comprende personas con distintas sensibilidades a la exposición a RF. Normalmente, para el público en general se recomienda un límite básico de 0,08 W/kg, obtenido al añadir un factor de seguridad de 5. En los cuadros 34 y 35 de la presente publicación se ofrecen los límites de exposición derivados.

Las limitaciones para el IAE medio para todo el organismo no son lo bastante restrictivas, puesto que la distribución de la energía absorbida en el organismo humano puede ser muy heterogénea y depender de las condiciones de exposición a RF. En situaciones de exposición parcial del cuerpo, atendiendo a la frecuencia, la energía absorbida puede concentrarse en una cantidad limitada de tejido, aunque el IAE medio para todo el organismo se restrinja a menos de 0,4 W/kg. Así pues, se recomiendan límites básicos adicionales de 2 W/100 g en cualquier otra parte del organismo, a fin de evitar que se produzcan elevaciones excesivas de la temperatura a nivel local. Tal vez haya que prestar especial atención a los ojos.

En el caso de las frecuencias inferiores a alrededor de 1 MHz, se han fijado límites de exposición que permitan prevenir la estimulación de células nerviosas y musculares. Los límites básicos de exposición se refieren a densidades de corriente inducidas dentro de los tejidos orgánicos. Los límites de exposición deben tener un factor de seguridad suficiente para restringir la densidad de corriente a 10 mA/m² a 300 Hz, valor que se encuentra en el mismo orden de magnitud que las corrientes naturales del organismo. Por encima de 300 Hz, la densidad de corriente necesaria para excitar el tejido nervioso aumenta con la frecuencia, hasta que se alcanza una frecuencia en la que dominan los efectos térmicos. Para las frecuencias en torno a 2-3 MHz, el límite básico para la densidad de corriente equivale al límite para el IAE máximo de 1 W/100 g. Como en las situaciones prácticas de exposición es difícil medir los valores del IAE y de la densidad de corriente inducida, los límites de exposición en función de cantidades fácilmente medibles deben derivarse de los límites básicos. Estos «límites derivados» indican los límites aceptables, respecto de los parámetros medidos y/o calculados en el campo, que permiten respetar los límites básicos.

1.7.2 Límites de exposición ocupacional

Las poblaciones expuestas en el lugar de trabajo están formadas por adultos expuestos en condiciones controladas y que están al tanto de los riesgos que ello supone. Dada la amplitud de la gama de frecuencias de que se ocupa la presente publicación, no es posible dar una cifra única como límite de exposición ocupacional. En el cuadro 34 figuran los límites ocupacionales derivados recomendados en la banda de frecuencias comprendida entre 100 kHz y 300 GHz. Se recomienda abordar con prudencia los campos pulsátiles en los que

las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos se limitan a 32 veces los valores ofrecidos en el cuadro 34, promediados sobre la duración del pulso, y la densidad de potencia se limita a un valor de 1000 veces el valor correspondiente del cuadro 34, promediado sobre la duración del pulso.

1.7.3 Límites de exposición para la población general

La población general comprende personas de distintos grupos de edad, distintos estados de salud, y mujeres embarazadas. La posibilidad de que el feto en desarrollo pueda ser particularmente sensible a la exposición a RF merece especial consideración.

Los límites de exposición para la población general deben ser más bajos que los correspondientes a la exposición ocupacional. Por ejemplo, los límites derivados recomendados en la banda de frecuencias de 100 kHz-300 GHz figuran en el cuadro 35, y son en general inferiores por un factor de 5 a los límites ocupacionales.

1.7.4 Aplicación de normas

La aplicación de las normas protectoras ocupacionales y de salud pública respecto de los campos de RF exige designar responsables de la medición de la intensidad de los campos y de la interpretación de los resultados, así como establecer códigos y guías de seguridad detallados sobre protección contra los campos, que indiquen, según convenga, los modos y medios de reducir la exposición.

1.8 Medidas de protección

Entre las medidas de protección figuran la vigilancia en el lugar de trabajo (encuestas sobre exposición), los controles técnicos, los controles administrativos, la protección personal y la vigilancia médica. Cuando las encuestas sobre los campos de RF indiquen niveles de exposición en el lugar de trabajo superiores a los límites recomendados para la población general, debe ponerse en marcha la vigilancia ocupacional. Cuando indiquen niveles de exposición superiores a los límites recomendados, deben adoptarse medidas para proteger a los trabajadores. En primer lugar, deben aplicarse controles técnicos, cuando sea posible, a fin de reducir las emisiones hasta niveles aceptables. Entre esos controles figuran un buen

control del diseño en lo que respecta a la seguridad y, cuando sea necesario, el uso de dispositivos cortacorrientes u otros similares.

Los controles administrativos, como la limitación del acceso y el uso de alarmas auditivas y visuales, deben usarse en conjunción con los controles técnicos. A pesar de su utilidad en ciertas circunstancias, el uso de protección personal (vestimenta protectora) debe considerarse un último recurso para velar por la seguridad del trabajador. Siempre que sea posible, debe darse prioridad a los controles técnicos y administrativos. Cuando exista la posibilidad de que los trabajadores estén expuestos a niveles superiores a los límites aplicables a la población general, debe examinarse la posibilidad de poner a su disposición vigilancia médica apropiada.

La prevención de los riesgos para la salud relacionados con los campos de RF exige asimismo establecer y aplicar normas para velar por: a) la prevención de la interferencia con el equipo y los dispositivos electrónicos de seguridad y médicos (inclusive los marcapasos cardíacos); b) la prevención de la detonación de dispositivos electroexplosivos (detonadores); y c) la prevención de incendios y explosiones a partir de chispas provocadas por los campos inducidos.

2. Recomendaciones para estudios ulteriores

2.1 Introducción

Preocupan los posibles efectos de los campos de RF en lo que se refiere a la promoción y la progresión del cáncer, a las disfunciones reproductivas, como los abortos espontáneos y las malformaciones congénitas, y a los efectos en el funcionamiento del sistema nervioso central. No se conocen lo bastante estas cuestiones como para determinar si existen esos efectos y, por tanto, no hay ninguna base racional sobre la que formular recomendaciones para proteger a la población general de los posibles efectos adversos.

Todas las investigaciones que se emprendan sobre los mecanismos de interacción débil por una parte y los estudios de los efectos sobre la carcinogénesis y la reproducción en animales y humanos por otra parte, deben estar sumamente coordinadas. Esa coordinación puede conseguirse concentrando la asignación de fondos en las propuestas de investigación que tengan carácter

multidisciplinario y multiinstitucional. Los estudios sobre los efectos de los campos de RF podrían coordinarse con programas semejantes sobre los efectos de los campos de ELF (50/60 Hz). Debe darse gran prioridad a las investigaciones que se ocupen de las relaciones causales y los umbrales y coeficientes dosis/efecto.

A continuación figura una lista de aspectos prioritarios que, a juicio del grupo de trabajo, necesitan estudiarse más a fondo.

2.2 Campos pulsátiles

Aún no se comprenden los efectos de los campos pulsátiles en los que se dan máximos de densidad de potencia muy elevados separados por periodos de potencia cero. Sólo se dispone de algunos informes aislados sobre los efectos de estos campos y no es posible identificar ni la frecuencia ni el dominio de importancia de los máximos de potencia. Se necesitan con urgencia datos para evaluar los riesgos para la salud humana referidos a los máximos de potencia de los pulsos, la frecuencia de repetición, la longitud de los pulsos y la frecuencia de la RF en el pulso, en vista de la aplicación cada vez más difundida de sistemas que utilizan pulsos de alta potencia (principalmente radares), y que entrañan la exposición tanto ocupacional como de la población general.

2.3 Estudios sobre el cáncer, la reproducción y el sistema nervioso

Cada vez preocupa más seriamente la posibilidad de que la exposición a RF pueda intervenir como causante o favorecedor del cáncer, especialmente de los órganos hematopoyéticos o en el sistema nervioso central. Tampoco se conocen a ciencia cierta los posibles efectos en la reproducción, como las mayores tasas de aborto espontáneo y de malformaciones congénitas.

Los efectos de la exposición a RF en la función del sistema nervioso central, con los cambios correspondientes en las funciones cognitivas, también están envueltos en la incertidumbre. En vista de la posible importancia de esas interacciones y de los trastornos causados por esa incertidumbre en la sociedad, debe darse gran prioridad a las investigaciones en este campo. Importa coordinar los esfuerzos de investigación para aclarar los conocimientos en lugar de aumentar el nivel de incertidumbre. Las investigaciones sobre los posibles mecanismos, como las interacciones de campos débiles,

deben coordinarse estrechamente con estudios de toxicología en animales debidamente diseñados y con epidemiología humana.

2.4 Interacciones de campos débiles

Muy pocas personas están expuestas a niveles térmicamente significativos de RF; la gran mayoría de las exposiciones se dan a niveles en los que las interacciones de campos débiles serían la única fuente posible de respuestas adversas en la salud. Hay un volumen considerable de datos experimentales que implican respuestas a los campos de RF de amplitud modulada, que muestran ventanas de frecuencia y de amplitud; algunas respuestas dependen de la coexposición a agentes físicos y químicos. Es de primera importancia establecer los efectos para la salud humana y sus relaciones dosis/respuesta. Se necesitan estudios que definan los mecanismos biofísicos de interacción y que amplíen los estudios en animales y en el ser humano, a fin de determinar los riesgos para la salud.

2.5 Epidemiología

Los estudios epidemiológicos sobre la asociación entre los campos de RF y el cáncer y los efectos adversos en la reproducción se ven dificultados por varios factores:

- La mayoría de los miembros de cualquier población se ven expuestos a niveles de RF que se encuentran a varios órdenes de magnitud por debajo de los niveles que revisten importancia desde el punto de vista térmico.
- Es muy difícil establecer la exposición a RF en individuos durante un periodo de tiempo significativo.
- Es muy difícil controlar los principales factores que inducen a confusión.

Algunas de las fuentes de dificultades, aunque no todas, pueden salvarse mediante un estudio de control de casos bien diseñado y aplicado. Se están realizando o planificando estudios de ese tipo para estudiar el cáncer durante la infancia y los efectos de los campos de ELF. Importa que en esos estudios se evalúen las exposiciones a la radiación RF.