

ISSN - 0250 - 5010

ANNALEN
VAN
DE BELGISCHE VERENIGING
VOOR
STRALINGSBESCHERMING

VOL. 26, N°4, 2001

1e trim. 2002

**RISICO'S VERBONDEN AAN ZEER HOGE FREQUENTE
ELEKTROMAGNETISCHE VELDEN**

**RISQUES ASSOCIES AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES
DE TRES HAUTE FREQUENCES**

Driemaandelijkse periodiek

Périodique trimestriel

2400 MOL 1

2400 MOL 1

ANNALES
DE
L'ASSOCIATION BELGE
DE
RADIOPROTECTION

Hoofdredacteur

Mr C. Steinkuhler
Rue de la Station 15
B- 1325 Longueville

Rédacteur en chef

Redactiesecretariaat

Mme Cl. Stiévenart
Av. Armand Huysmans 206, bte 10
B- 1050 Bruxelles - Brussel

Secrétaire de Rédaction

Publikatie van teksten in de Annales gebeurt onder volledige verantwoordelijkheid van de auteurs. Nadruk, zelfs gedeeltelijk uit deze teksten, mag enkel met schriftelijke toestemming van de auteurs en van de Redactie.

Les textes publiés dans les Annales le sont sous l'entière responsabilité des auteurs. Toute reproduction, même partielle, ne se fera qu'avec l'autorisation écrite des auteurs et de la Rédaction.

Ce numéro contient les textes d'exposés présentés lors de la réunion organisée par l'Association belge de Radioprotection à Bruxelles, le 12 octobre 2001, consacrée aux

Dit nummer bevat de teksten van de uiteenzettingen gedaan ter gelegenheid van de vergadering van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming in Brussel, op 12 oktober 2001 gewijd aan de

RISQUES ASSOCIES AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES DE TRES HAUTES FREQUENCES

RISICO'S VERBONDEN AAN ZEER HOOG FREQUENTE ELEKTROMAGNETISCHE VELDEN

SOMMAIRE

Mobile Telephones, Microwave standards, Safety and Health
W. VAN LOOCK

Biological effects and potential hazards of GSM-radiation
L. VERSCHAEVE

Les systèmes de communication mobile : principes et technologies
B. STOCKBROECKX, B. CLERCKX

Conclusions de l'étude menée par l'ISSeP concernant les champs électromagnétiques à proximité des antennes relais de mobilophonie
W. PIRARD

INHOUD

p.235

p.251

p.265

p.293

MOBILE TELEPHONES, MICROWAVE STANDARDS, SAFETY AND HEALTH

W. Van Loock

Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 41, B 9000 Ghent, Belgium

ABSTRACT

Non ionizing radiation such as electric and magnetic fields, and radio waves has many effects on the human body, depending on the frequency of the electromagnetic energy. Guidelines and standards to protect against harmful effects of microwaves such as from mobile telephones and GSM are based on thermal effects. There are many problems such as safety, electro-stress, health and cancer. For tele-communication business, high exposure levels are interesting. However, for safety, comfort and health of the general public, exposure levels must be low. A safety factor more than 200 is necessary instead of the factor 50 used in the most referenced guidelines for standards, such as these of ICNIRP and WHO.

1. INTRODUCTION

In the universe, only a few forms of energy are known: mechanical energy, chemical energy, electromagnetic energy and nuclear energy. An intense time rate of any energy produces harmful effects, heating, burns and at high levels, destruction.

Perhaps the most common energy form is electromagnetic energy (EME): visible light, heat radiation one can feel, electricity, radio waves and X rays. EME propagates at the speed of light and is carried by electric and magnetic forces, commonly called fields, field strengths or force fields.

A fundamental phenomenon in electromagnetism is that a changing electric force produces a changing magnetic force and that a changing magnetic force produces a changing electric force. The fundamental change of a physical quantity such as a displacement or a force is a harmonic change. A harmonic change is easy to create and mathematically, all other types of changes of a physical quantity can be analyzed with the knowledge of its harmonic change. The harmonic change of a quantity is better known as an oscillatory change or a vibration when there is a displacement, or as a change according to a sine change or to a sine wave. A harmonic change is characterized by a frequency, it is the number of equal harmonic changes per second or the number of equal sine waves per second. For example, the frequency of the voltage between the contacts of the electric power plug is 50 Hz. It means that the voltage, when plotted in a graph as a function of time changes according to a sine, 50 times per second. When EME propagates, the field strength plotted in a graph as a function of distance changes as a sine. The distance of a period is called a wavelength and commonly denoted λ the Greek letter lambda. The relation between the frequency f and the wavelength λ is

$f = v \lambda$ with v the speed of propagation which becomes c , the speed of light for EME in free space.

Mathematically, a force is a vector quantity. Energy and power are scalar quantities or scalars. Details can be found in many courses and textbooks, also on the fundamentals of electromagnetism and the interactions with biological systems.

2. ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

Frequencies, from 10 kHz up to 300 GHz are associated with radio waves, see Figure 1 for the location of this range in the non-ionizing part of the EME spectrum. An axis is given for the frequency and for the corresponding wavelength in free space. Another axis indicates the photon or quantum energy in electron volt that is important above about 10 eV, for ionizing properties of electromagnetic radiation. Many names are used for different frequency ranges and the applications of radio waves are not limited to broadcasting, television and radar. Conventional abbreviations denoting smaller bands are also given in the Fig. 1. For example, UHF which is the band from 300 MHz to 3 GHz, stands for ultra high frequency and SHF and EHF are resp. abbreviations for super and extreme high frequency.

Historically, microwaves cover the range from 300 MHz to 300 GHz, although the band 30 - 300 GHz is now usually called the millimeter band.

Mobile telephones use frequencies such as 900 MHz (for example the cellular system GSM 900), 1 800 MHz (typically GSM 1800) and 2 400 MHz (for applications such as the wireless office).

At the left side in Fig. 1, some objects are listed. They have a dimension roughly the same as the wavelength. If an object has a dimension about equal or larger than the incident wavelength of the EME, then there is possibility for an increased interaction with this energy. If a dimension of an object is roughly the same as the wavelength of the incident electromagnetic energy, then there can be an intense or resonant interaction. These phenomena have nothing to do with the frequency of the energy. For human safety standards it is important to consider in particular the frequency range from 10 to 400 MHz because of possible resonant interaction.

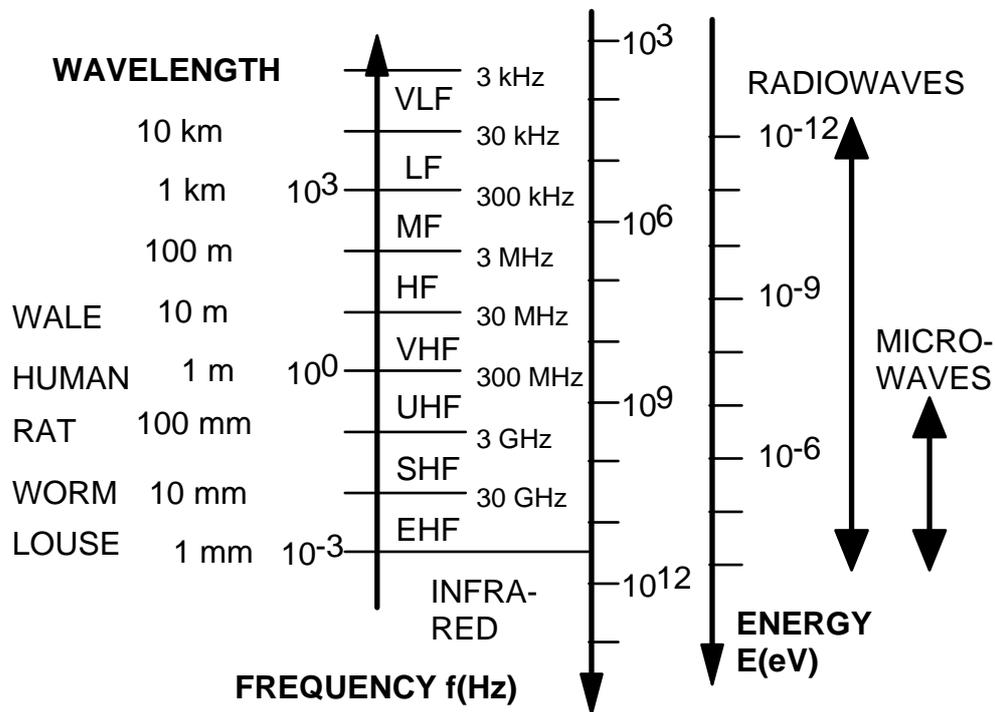


FIG. 1

Wave length, frequency and photon energy ranges of radio waves in the electromagnetic energy spectrum. Objects having a dimension roughly much smaller than the wavelength can show energy interaction. If a dimension is roughly equal to the wavelength an increased or resonant interaction can take place.

3. RADIO WAVES AND MICROWAVES

Practically all radio energy is generated artificially and this energy is normally coherent energy because of the small frequency bands that are used for telecommunication. Figure 2 shows a part of the radio spectrum in use for the mobile telephone system GSM 900. Transmission of information on radio waves it is not possible on a single frequency. A small band of frequencies commonly called a channel must be used. The centre frequency of the band is the frequency of broadcasting station or of the communication channel.

Mobile telephones such as GSM use microwaves that are the same microwaves applied in microwave domestic ovens.

Today, practically the whole radio spectrum is being exploited for telecommunication application and information technology. All other applications of radio energy are called ISM – it stands for industry, science and medicine and it includes also domestic applications. A limited number of frequency bands is designated for ISM use. In the microwave range it is world wide 2.45 GHz. A band around 896 MHz is allowed in the U.K. and around 915 MHz in North America [1], these bands are now occupied by the GSM 900 system.

ISM applications are mainly for heating of materials and involve high power levels, typically more than 100 W. A successful ISM application is the microwave domestic oven. It uses 2.45 GHz but up to the seventies, domestic ovens in North America operated also at 915 MHz. Typical power levels for a domestic oven are 0.6 to 1 kW. In industry, hundreds of kilowatts are being used for large-scale heat treatment of all kind of materials.

ISM systems for heating apply the energy to the material in a special structure called an applicator or oven that are usually closed systems. Telecommunication uses antennas that are open structures to transmit, emit or radiate radio energy into the environment. High levels of power are used to cover areas as large as possible for broadcasting or other wireless communication purposes.

The success of the mobile telephones and other technologies such as the wireless office, has triggered a severe business pressure for the using the radio spectrum exclusively for telecommunication and information technology.

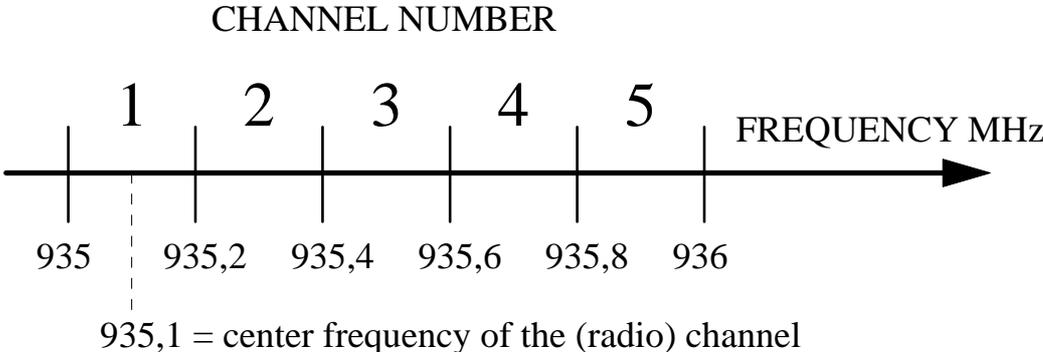


FIG. 2
Telecommunication uses frequency bands for transfer of information. The bands are called channels. The figure shows part of the spectrum in use for GSM 900.

4. RADIO WAVES AND HUMAN SAFETY

After World War II, high power radio waves for applications such as radar and the increasing number of all types of transmitters have generated also guidelines, regulations, laws and standards to protect workers and the general public.

Human exposure to electromagnetic energy such as radio waves is now usually denoted exposure to electromagnetic field (EMF).

Today, many guidelines and standards exist. The first and oldest standard to protect the general public deals with microwave leakage from domestic ovens. In Europe, it is the leakage standard EN 60-335-2-25. This standard limits the microwave emissions to 5 mW/cm² at 5 cm distance from the oven. Originally, this leakage standard was based on the 1953 US Navy standard. It considered an incident power density of 10 mW/cm² safe for whole body exposure of military workers (Fig. 3). Such an incident power density is roughly one tenth of the maximum incident power density of the radiation from the sun.

The most vulnerable organ is the eye and to protect the eye form microwaves, the leakage limit was originally set at 10 mW/cm² at 5 cm distance form the oven. It is difficult to come

closer than about 5 cm to a radiating or leaking seam or hole of a system such as a microwave oven. Later, in 1976 the IEC standard was published [2] and became for the European standard EN 60-335-2-25.

Other standards deal with human safety when exposed to EMF. In Europe, the first standard for protecting workers and the general public was published in 1995 as two draft standard ENV 50611-1 & -2. This European “prestandard” was the result of a study by Austria [3] and has been prepared by SC 111A and B, of the Technical Committee CENELEC TC 111 “Electromagnetic fields in the human environment” [4]. The drafts have been withdrawn and replaced for the safety of the general public by the Council Recommendations of July 12, 1999 [5] and some other documents for example an European specification ES 59005 (1998) for mobile telephone – a measuring procedure, and the EN 50361 (2000) which deal with SAR measurements.

Leakage should not be confused with emission and exposure to EMF. Leakage is an emission or a radiation close to the equipment, and must be measured at 5 cm distance from the equipment. A special leak detector is required and its properties are described in the leakage standard for microwave ovens [2]. Emission is a term used in electromagnetic compatibility and it is measured at a standard distance, usually between 3 and 30 m. Emission measurements require calibrated antennas and a receiver or spectrum analyzer. The measurement procedures for this type of radiation are described in standards, for Europe in the standard EN 55011 [6].

Exposure of the body deals with field strength, energy and rate of energy incident on the whole body and the energy penetrating it. Sometimes the word immission is used in analogy with chemical and radioactive pollution.

5. BASICS OF STANDARDS

Safety standards are usually based on direct observable effects. A minimum level necessary for having a direct (adverse) effect is determined scientifically and with the aid of statistical studies. The minimum level to be used in a safety standard is decided by consensus, this means by voting. Then safety factors are applied on this decided new minimum level, usually a factor 10 for workers – because their exposure is limited by working time for example 8 hours a day. Another factor of 5 is applied for the general public so that the safety factor (SF) becomes 50 on the minimum level. Workers are in a controlled environment and therefore, lower levels are necessary for the general public. A reason for applying a lower level for the public is because potentially, the public can be exposed 24 h a day. Other reasons are: no medical control is possible, no protective measures can be imposed, extra stress on the body, in this case “electrostress” should be avoided as much as practically possible and also people are different.

Exposure to low levels over long periods of time and the so called low level effects are not considered in EMF safety standards.

6. BIO-EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC ENERGY, AN OVERVIEW

A simplistic and general overview of the interaction of EME with the human body is presented hereafter. Any electromagnetic energy on the body will produce heat and high rates of energy produce always destruction. In the human body there are no free electrons (negative ions) for conduction such as in metals – the free charged particles are ions having masses much larger than the mass of the electron. In the body there are many different ion concentration. A change in an ion concentration produces a physiological effect – this is a non-thermal or an athermal effect. For example, one can feel the electric current before there is any sensation of heat or measurable heat generation. Field forces at low frequencies produce ion migrations, that modify the ion concentrations producing physiological or non-thermal effects. At high frequencies, because of the large ion masses involved, the distance over which the migrations can take place is less than roughly the diameter of the molecules – there are no resulting changes in ion concentrations, and therefore, no physiological effects or no athermal effect. However, because of its movements, the kinetic energy of the ions increases. At high frequencies in particular at microwaves there is another phenomenon. Dipole molecules such as water molecules tend to rotate. The forces of the electric field tend to align the charges of the dipole molecule. The rotation is also an increase of kinetic energy. At -273°C , the kinetic energy = 0, an increase in temperature is an increase of kinetic energy. High frequency above about 10 MHz and microwaves do not cause ion migration in the body but cause an increase of the kinetic energy in particular of the dipole molecules. The overall effect is an increase of temperature, transfer of heat energy or a thermal effect. It should be mentioned however, that up to now the limit is not known exactly, it may be somewhere between 0.3 and 30 MHz.

More than 100 years ago medical doctors were convinced that radio frequencies produce thermal effects and they started to apply this energy for healing. It was also known that low frequencies produced other effects than thermal effects. Figure 3 illustrates this clearly. A crude model of the body is solution of salt in water and a direct current through two electrodes in contact with the skin causes ions to migrate. Desiccation takes place at the positive electrode giving an anaesthetic effect while at the other electrode the skin becomes red and sensitive. As the frequency increases, ion migration distances become too small for producing physiologic effects [7].

It should be emphasized that fundamentally, all bio-effects are a result of the frequency. The number of periodical changes per second of the electric and magnetic forces on the ions causes bio-effects.

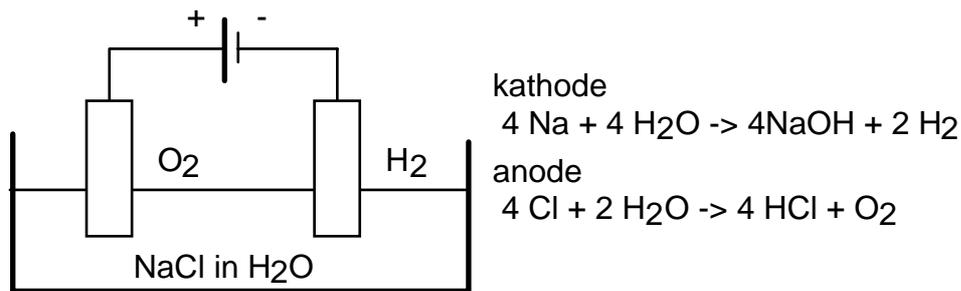


FIG. 3 An electric current causes ions to migrate. Reactions at the electrode interface are shown. In living organisms, the ion migration generates physiological effects

7. THERMOREGULATION AND SAR

High frequency or microwave energy absorbed in the body causes in the first instance, heat or thermal effects. Thermoregulation of the human body reacts to maintain a constant temperature. The hot sensors in the skin signal to the brain and the blood circulation is then locally increased for cooling. Muscle tissue is also provided with hot sensors. When the muscles produce work, they heat up, the hot sensors signal to the brain and the blood circulation increases to cool down. If the blood circulation cannot cope with the temperature increase of the body, then sweating starts. In general, overheating is prevented by loss of heat mainly in the form of infrared radiation losses, conduction losses and convection losses such as evaporation and sweating.

The living body produces heat. At rest (sleeping) the metabolic energy production rate is about 80 W and a standard man of 80 kg produces therefore on the average 1 W/kg. This is the specific production rate, the SPR. Some SPR values for other activities are: for walking 1.3 W/kg, sitting 1.5, standing 1.8, jogging 3 and for running up to 15 W/kg and more.

Originally, military scientist thought that the body when absorbing extra energy – from the sun or from incident radio waves from transmitters and radar - could cope easily with the resulting temperature increase, provided the incident power density over the whole body was limited to 10 mW/cm² corresponding to about one tenth of the maximum sun radiation [8]. Later, the specific absorption rate, SAR (W/kg) was introduced. If the body absorbs electromagnetic energy such as sunlight or radio waves at a rate so that on the average the SAR increases, then a level can be reached where the thermoregulation of the body cannot compensate the temperature increase leading to hyperthermia and ultimately to death.

8. DETAILS OF STANDARDS

At low frequencies the mobility of the ions in the body as a consequence of the force fields, is very high – almost like the electrons in metal. At low frequencies, the body behaves like a metal and acts as a shield for electromagnetic energy. However, low frequency magnetic fields produce eddy currents inside the body and these can produce changes in ion concentrations generating physiologic effects. After the publication of Wertheimer and Leaper in 1979 [9] – on cancer and high voltage lines – the scientific world started to study this

problem. After about ten years, at the end of the eighties, safety levels for low frequency magnetic fields were introduced.

In spite of thousands of scientific studies reporting many bio-effects in vitro, there is now a general consensus in the scientific world that electromagnetic energy absorbed in the body produces in the first instance only thermal effects provided the frequency is higher than 10 MHz. Therefore, it is likely that there is no cancer risk from radio waves.

Early safety limits for radio waves were based on incident power density, see figure 4 for an overview. Note that higher power densities can be supported for shorter periods of time. In the US, one tenth of an hour i.e. 6 minutes was considered as the limit. In figure 4, the operation range for diathermia is given as well as the sensation level and the pain threshold [7].

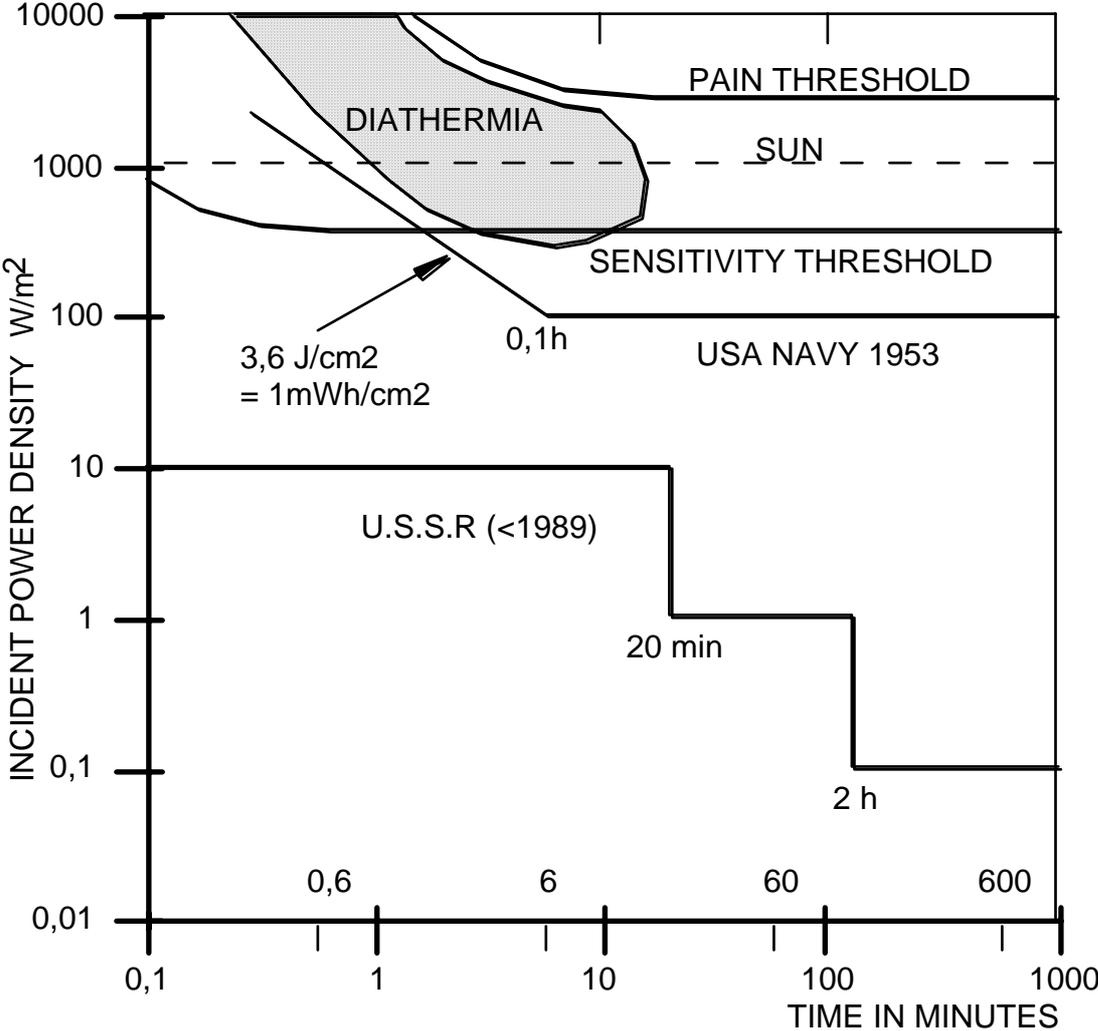


FIG. 4
Early safety limits to protect people from radio waves.

Today, practically all accepted guidelines explain that known and scientific proven biological effects appear at a time and mass averaged whole body SAR (specific absorption rate) of about 4 W/kg, see for example WHO (World Health Organization) [10] and ICNIRP (Int. Commission of Non Ionizing Radiation Protection) [11]. This level of 4 W/kg is the risk level

or the level of acute effects [5]. For workers, a safety factor of 10 is used giving the accepted basic restriction of 0.4 W/kg. For the general public, another factor 5 is applied so that the basic restriction for the general public becomes 0.08 W/kg [5]. This basic restriction of 0.08 W/kg for the general public is the result of a SF of 50 on the risk level of 4 W/kg.

The SAR is very difficult to measure but incident field strength and power densities are more easy to measure. The basic restrictions of 0.4 W/kg for workers and 0.08 W/kg for the general public are used to calculate the incident power densities and field strength, using a standard man. The corresponding levels are called the reference levels and are considered as practical limits which should guarantee that there is a good chance that the basic restrictions are fulfilled [5]. The relationship between the power density $p(\text{W/m}^2)$ and the electric field strength $E(\text{V/m})$ is

$$p = E^2/377$$

This relation holds when the source of the EME can be considered as a point source or in other words when the inverse square distance law holds for the power flux or power density.

Table 1 gives the values considered safe for whole body exposure of the general public according to [5] and of workers according to [4], for the interesting mobile telephone frequencies 900 and 1800 MHz and also for 2.45 GHz, the frequency of the domestic oven.

TABLE 1

Frequency MHz	power density, W/m^2		electric field, V/m	
	worker	public	workers	public
900	22.5	4,5	92.1	41.2
1 800	45	9	130	58.3
2 450	50	10	137	61.4

Figure 5 gives the incident power densities as a function of frequency according to [4] and the Council Recommendations of 12 July 1999 [5] which are for the frequency range from 10 MHz and up, identical to the levels for the general public in the ENV 50166 [4]. These details of the reference levels for the general public are:

10 - 400 MHz	2 W/m^2
400 – 2 000 MHz	$f(\text{MHz})/200 \text{ W/m}^2$
2 – 300 GHz	10 W/m^2

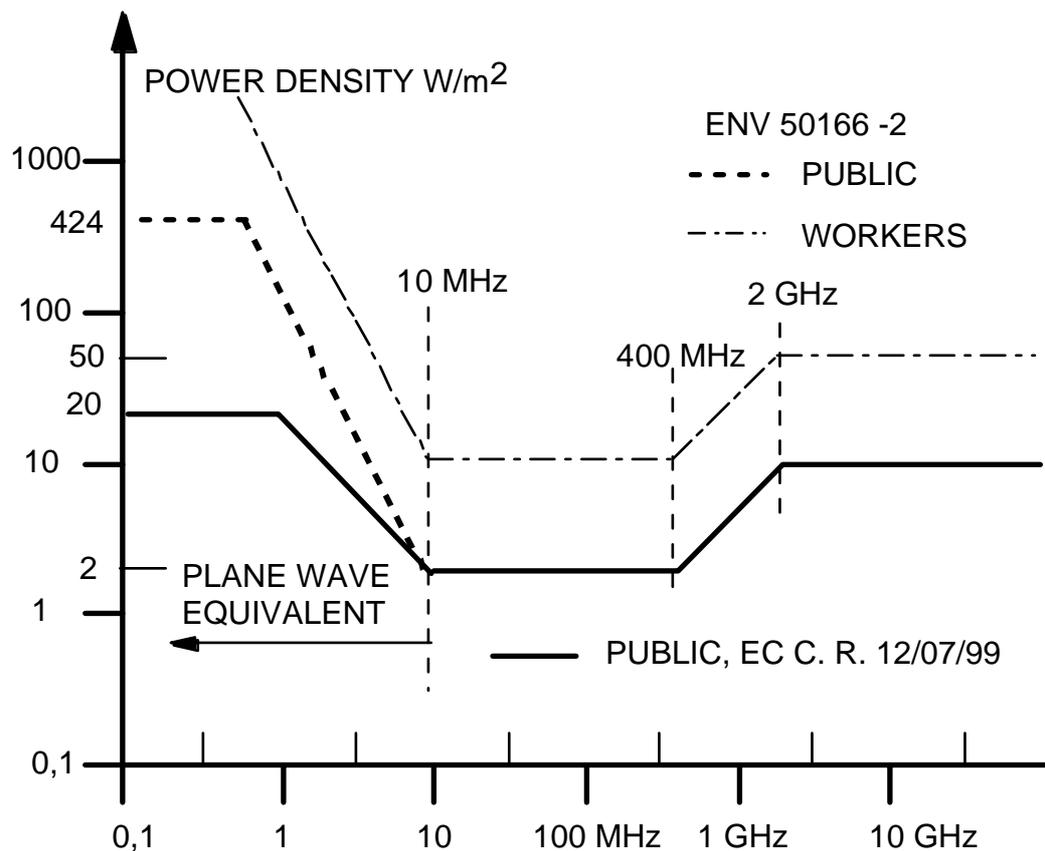


FIG. 5

Safety levels (reference levels) for workers and the general public, according to the former ENV 50166 and for the general public the European Communities Council Recommendations of 12 July 1999.

9. DISCUSSION

Many international accepted guidelines dealing with human safety in electromagnetic fields (EMF) exist. Although the historical basis is different, the guidelines of WHO which promotes the guidelines of ICNIRP, are now considered as the framework to protect workers and the general public for the development of national and international standards.

The last decade, much confusion has arisen from mobile telephone technology. Many countries in Europe have adopted safety standards more stringent than the conventional guidelines of WHO or the Council Recommendations.

It is also known that several workers, in the vicinity of GSM base station antennas (a few meters), had to be taken to the hospital for a specialized treatment during many days [private communication, 2000]. The symptoms of the victims seem to have corresponded to an increased internal body temperature: painful pressure above the eyes, headache, gastrointestinal disturbances, an increase in blood pressure etc.

The logic of deciding for the risk level of 4 W/kg is not accurate. It is claimed that in normal thermal environments, a SAR of 1 – 4 W/kg for 30 minutes produces an average body

temperature increases of less than 1°C in healthy adults and their thermoregulation can cope with this rise [10]. Therefore, the risk level should be 1 W/kg and not 4 W/kg. The basic restriction for workers becomes 0.1 W/kg and for the general public 0.02 W/kg. This basic restriction of 0.02 W/kg for the general public is the result of a SF 200 instead of 50 on the risk level of 4 W/kg.

The resulting values of incident power densities and electric field strength for important microwave frequencies are given in Table 2. Some countries (for example Belgium) have adopted these values to protect the public from the energy of stationary antennas.

TABLE 2

Frequency MHz	power density, W/m ²		electric field, V/m	
	worker	public	workers	public
900	5.6	1.13	46.1	20.6
1 800	11.3	2.25	65.1	29.1
2 450	12.5	2.50	68.7	30.7

The factor 5 between the (power) levels for workers and the general public is too small. The WHO guidelines and many other guidelines do not give a definition of “normal conditions”. Workers are supposed to be adults in good health and able to execute coordinated operations. Other arguments to increase the factor 5 are:

- Other than healthy adults: children, elderly and handicapped or ill people;
- Extreme conditions of temperature and humidity have to be considered;
- Non sufficient ventilation and abnormal clothing are possible;
- The general public is a heterogeneous group with a broad spectrum of sensitivities.

As can be seen in Fig. 4, the actual standards to protect the general public are only about a factor 10 below the power density which one can feel for example on his hand. Moreover, a metal plate can produce standing waves in which the power densities can be up to 6 dB (4 times) higher. Also, resonant waves in which the power densities are 10 to 100 times higher, can exist between walls and metal walls, typically in factories. Therefore, the reference levels must be reduced. The levels for workers are in the range of the sensitivity level. Complaints such as uncomfortable feeling (electrostress) are therefore likely not only in an industrial environment but also in the vicinity of antennas where people have to live 24 h a day.

Therefore, a SF more than 200 should be applied on the risk level of 4 W/kg, for the safety of the general public.

Some countries (Poland, Italy, Spain, Switzerland...) have applied a SF 1000. The corresponding field strengths are 4 V/m for GSM 900 and 6 V/m for GSM 1800.

Because of existing immunity requirements of 3 V/m in electromagnetic compatibility [11], this field strength as the result of a SF 2000 should be applied for avoiding problems with medical devices and the like. The level of 3 V/m or 0.024 W/m² is somewhat lower than the former Russian standard, see Fig. 4.

10. LOCAL SAR

A source of radio energy such as an antenna of a handset, must emit a reasonable power to cover a large area for comfortable communication around a base station. Normally, an amount of a quarter to half of that power is absorbed in the head depending on the antenna location. This absorbed power increases locally, in the head, the SAR and the blood circulation will equalize this heat over the whole body but this takes time. Cordless telephones use 100 mW at 915 MHz but the distance to cover is limited to a 100 m in free space. Several watts are required to cover large distances and the high power will increase locally the SAR. Therefore, guidelines and standards must allow a higher SAR, locally because otherwise the use of mobile telephones is not compatible.

The Council Recommendations [5] allow continuously for the general public a higher SAR of 2 W/kg locally for the chest and the head.

Many years ago, W. Mumford wrote already [8]: *“it is believed that there are two types of heating with microwaves: a general rise of the body temperature and a more localized heating. The human body can compensate for a certain amount of heating of the first type, provided the temperature rise is not too sudden. Compensating mechanisms for coping with the second type of heating are less adequate. Circulating blood act as a coolant...”*. So, there is a problem with mobile telephones because computer studies and phantom simulations of the handset with its microwave source close to the head, demonstrate concentration of heat energy i.e. a hot spots in the brain. In a healthy body a temperature increase is caused by the activity of muscles and starts in within the muscles. The blood circulation is better in muscles than in the brain. If there is temperature increase due to for example absorbed microwaves then the sensors of the skin will control blood circulation, but there are no sensors in the brain. Also, the heat load due to absorbed radio waves in the brain is unnatural, it does not exist in nature; this suggests that the thermoregulation is probably not well adapted to cope with this type of heat load.

Consider 2 W microwave power emitted by the GSM antenna of the handset close to the head. Suppose that all the power is absorbed in the brain because of the local circumstances for example metal walls in a special configuration. When sitting and making a telephone call the SPR is 1.5 W/kg. The brain of a standard man is 1.3 kg so the SAR due to the 2 W is 1.5 W/kg. This is compatible with the Council Recommendations. However, the balance in the brain is a specific activity or heat rate of 3 W/kg corresponding with an activity of fast walking or jogging. If this brain load of 3 W/kg is sustained too long it results in known complaints: headache, dizziness, fatigue, red ears etc. The 2 W microwave load is unnatural and besides, one cannot fast walk or jog continuously, 24 hours a days.

Clearly the local SAR is too high. People complain, but it is not likely that the 2 W microwaves will cause cancer because the frequency is too high for any physiological effect.

11. CONCLUSION

Guidelines and standards to protect workers and the general public from electromagnetic fields such as from radio waves, in particular from the microwaves of mobile telephones are based on the specific absorption rate or SAR (W/kg) for a risk level and basic restrictions. The SAR is difficult to measure, therefore reference level in power density and electric field strength are derived for practical use.

Simple considerations and calculations reveal that the levels in the standard are too conservative. Many countries in Europe have now adopted safety standards more stringent than the conventional guidelines such as these of the WHO and of the Council Recommendation. To protect workers and in particular the general public, safety factors of 200 and more have to be used instead of the 50 dictated in guidelines and standards.

REFERENCES

1. ITU-R Radio Regulations, Int. Telecommunication Union, Geneva, 1998.
2. Int. Electrical Commission, IEC standard, "Safety of household and similar electrical appliances. Part 2: Particular requirements for microwave cooking appliances", Publication 335-25, first edition, Geneva 1976.
3. CENELEC, "Survey on data concerning biological effects on the human body (including implants) of electromagnetic waves in the frequency range of 80 MHz – 6 GHz", 1995, Contract via OVE (Osterreichischen Verband fur Electrotechnik..
4. CENELEC, European Prestandard ENV 50166-1: Jan. 1995 - Human Exposure to Electromagnetic Field – Low frequency (0 Hz to 10 kHz). ENV 50166-2: High frequency (10 kHz to 300 GHz), 1995.
5. European Communities, Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), 1999/519/EC, p 59-68.
6. European standard EN 55011, "Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment, radio disturbance characteristics - limits and methods of measurements (CISPR 11: 1997:A1: 1999), CENELEC, Brussels 1999.
7. Van Loock W. M., "Gezondheid en elektromagnetism", ISBN 90 382 0212 1, Academia Press, Gent 1998.
8. Mumford, W. W., "Some technical aspects of microwave radiation", Proc. IRE, Vol. 49 nr 2, 1961, pp 427- 447.
9. Wertheimer N. and Leeper E., "Electrical Wiring configurations and childhood cancer", Am. J. Epidemiol, Vol. 109, 1979, pp. 273-284.
10. World Health Organisation, "Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz), Environmental Health Criteria" publication 137, Geneva 1993.
11. European Commission, 1989. Guidelines on the application of Council Directive 89/336/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating the electromagnetic compatibility.

BIOLOGICAL EFFECTS AND POTENTIAL HAZARDS OF GSM-RADIATION

(Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming, Vol.26,n°4, 2001,pp.251-264)

L. Verschaeve

Vito, Environmental Toxicology, Boeretang 200, B-2400 Mol, Belgium.

Abstract

Due to modern developments people are increasingly exposed to several environmental pollutants or influences, including non-ionising radiation. Among them, microwaves, especially those emitted by wireless communication devices, greatly contribute to our daily domestic exposure. As all new technologies, mobile phones, particularly those from the rather new GSM system, are often suspected of having adverse health effects. However, up to now, all “expert groups” world-wide agree that there is, so far, no conclusive evidence that exposure to mobile phone electromagnetic fields from base station antennas and handsets pose a public health hazard. They consider that the international guidelines (e.g., from the “International Committee on Non Ionising Radiation Protection”) are sufficiently protective. Although more than 25 countries have adopted these (or very similar) guidelines as a national standard, others have applied more severe exposure limits based on a personal interpretation of the *precautionary principle*. Exposure limits may therefore vary considerably between one country or even one region and another adding to the general confusion and anxiety.

Introduction

In 1992 a man claimed that his wife’s brain tumour was due to the radiation received from her mobile phone. There was a lawsuit but due to a “lack of evidence” this was classified without consequence. However, this was the starting point for a lot of media attention and many other claims, in the US, but shortly after that also in Europe and in the rest of the world. The media, and hence the public, continue to be concerned about the safety of mobile phones and their base station antennas. Results from “old” Eastern European research programmes on hazards from radar exposure and other sources of radiofrequency (RF) fields were reconsidered, and a lot of new research efforts were initiated on RF-bio effects, with particular reference to mobile phone frequencies. These studies are presently still going on. This research is/was stimulated by a number of national and international bodies, e.g., Wireless Technology Research” (Sund & Carlo, 1997) and FDA/CTIA¹ research projects in the US, “Forschung Gemeinschaft Funk”² in Germany, the 5th Framework Research Project of

¹ <http://www.fda.gov/cdrh/phones/>

² <http://www.fg-funk.de/>

the European Communities³, and others. Also the World Health Organisation (WHO) launched a “EMF-project”⁴ in 1996 that is expected to end within a few years.

Short review of ongoing investigations

Possible health effects of *electromagnetic field (EMF) energy* have been studied for decades, and several thousand studies are in the literature. Many concern radiofrequency (RF) radiation and hence also give information on possible mobile phone bio-effects, as they, and their base stations, also emit RF-fields. It should be noted that RF radiation belongs to the non-ionising radiation spectrum. Electromagnetic fields from mobile phones and their base stations cannot therefore be compared to ionising radiation like X-rays, gamma rays etc. Mobile phone frequencies are not able to break even the weakest chemical bond, as do X-rays.

Yet, adverse health effects are known. Provided sufficient power is produced, RF-fields can induce well-known *thermal* effects (cf. microwave oven). In thermal exposure conditions the temperature in tissues of exposed animals or in cells will increase and this results in a number of physiological changes that may eventually be hazardous. It is well known that temperature can induce a great number of health-related effects including, among others, birth defects, DNA damage, etc. In such cases effects are thus temperature related and are not due to the electromagnetic fields as such. Exposure to GSM- and other mobile telephone frequencies by base station antennas or the use of a handy is invariably too low to induce such thermal effects. Therefore, adverse health effects, if any, should be *non thermal* in nature.

As with any hazard assessment, the evaluation of potential health risks of EMF exposure is uncertain in many respects. In particular a number of epidemiological studies suggest the existence of weak links between exposure to EMF and human disease, and biological effects of RF-energy, including effects on humans, have been reported at levels below recommended exposure limits. Certain individuals also claim a variety of health problems when they are located near sources of electromagnetic fields, including those emitted by mobile phone base station antennas. The reported sensitivity reactions include a wide range of non-specific symptoms which afflicted individuals attribute to the EMF-exposure. The EMF levels are typical of those encountered in “normal environments” and hence are well below recommended exposure guidelines.

Despite above mentioned health problems or described biological effects in experimental systems (see below) all independent expert committees world-wide found the evidence for a health hazard too weak to be persuasive. In 1996 the McKinlay report (EC expert group, 1996) stated that “*the existing scientific literature [...] provides no convincing evidence that radiotelephones pose a long-term public health hazard*”. Later updates, taking into account a large number of recent studies,

³ <http://www.cordis.lu/fp5/home.html>

⁴ <http://www.who.int/peh-emf/>

did not allow a different conclusion. For example, in May 2000, the Stewart committee in the UK concluded that *“the balance of evidence to date suggests that exposures to RF radiation below recommended limits do not cause adverse health effects to the general population”* (IEGMP, 2000).

Why are reported biological effects and symptoms at “environmental exposure levels” not convincing enough to conclude that, among others, exposure to mobile phone base stations and handsets is hazardous to human health? We will try to give some answers below.

Evaluation of the scientific literature

It should at first be clear that only “peer reviewed” scientific reports could be taken into consideration. Any evaluation of scientific data therefore excludes data that do not provide sufficient guarantees with regard to proper dosimetry, statistics and used methodologies. Furthermore individual studies will always be considered important but they will have more weight if repeated by an independent laboratory that corroborates the results obtained. Unfortunately most studies have not been duplicated or, if they were, contradictory results were obtained. It should also be recognised that some of the reported effects cannot easily be linked to adverse human health effects, among others because they are obtained in experimental situations and in animals where extrapolation to the human situation is questionable. Some effects are similar in nature as those that are found in organisms that are exposed to, e.g., visible light, thus eliciting a biological effect without any indication of adverse health effect.

Laboratory experiments

Investigations were performed in many different research areas as, e.g., on central nervous system effects, immunological effects, effects on reproduction and development, cancer related studies, gene expression, synergism with known environmental carcinogens, etc. It is impossible to give a complete overview of the state of the science in only a few pages. Therefore we will focus on some generalities and particular results that attracted a lot of attention during these last months or years.

- Nervous system effects

Most investigations demonstrating any effect were related to thermal exposure levels. At non-thermal exposure levels the data are much more controversial. One investigation (Preece et al., 1999) attracted a lot of media attention. Most investigated endpoints did not show any difference between “exposed” and “unexposed” subjects but exposed subjects did show some *improved* memory capacity. The media and activists considered this a reason to believe that mobile phone radiation can impair normal brain function. Experiments on rats did show an effect on the blood-brain

barrier (Salford et al., 1994) although there was no evidence for increased risk of brain cancer. Some repeat experiments were already conducted and are still going on. So far the blood-brain barrier (BBB) results were not confirmed and no evidence for risks of brain cancer was obtained in other studies. It should also be noted that the BBB studies of Salford et al. did show that the effect increased when the exposure level was lowered.

- Cancer related effects

There is a quasi-general consensus that cancer is a multistep process including so-called *initiation*, *promotion* and *progression*. It should therefore be investigated whether RF-radiation is a possible cancer-initiator, a cancer promotor, or if it is able to influence cancer progression by any possible mechanism.

Cancer initiation is usually considered to coincide with a series of genetic events, e.g., DNA damage resulting in mutations. Therefore a lot of effort was made in order to investigate possible induction of genetic damage. In this respect experiments performed by Lai & Singh (1995, 1996) are of particular importance. These scientists demonstrated induction of DNA damage in the brain of rats that were exposed to 2450 MHz RF-fields. However, repeat experiments were not able to confirm these results (e.g., Malyapa et al., 1997_{a,b}). We also found synergistic effects between GSM-type radiation and a well-known human carcinogen (Maes et al., 1996) but further experiments by ourselves (Maes et al., 2001) and previous experiments by others involving other RF-frequencies, were not able to demonstrate such effects (Verschaeve, 1998; Verschaeve & Maes, 1998). The lack of consistency in the results thus prevents any firm conclusion. Furthermore Brusick et al. (1998_{a,b}) demonstrated that each test system is characterised by a given frequency of so-called *sporadic positive responses*; in other words, positive responses that have many possible reasons that have nothing to do with the compound (or physical factor) under investigation. By extracting such sporadic positive responses from the number of positive findings almost no positive responses remain. It is therefore unlikely that RF-radiation induces genetic effects, and hence that it acts as a tumour initiator.

Recently de Pomerai et al. (2000) demonstrated induction of particular *heat shock proteins* (HSP) in a small worm after exposure to low level radiofrequency fields. This observation is very important from a scientific point of view but cannot be related to human health effects so far. Furthermore, other investigations in the same field did not provide evidence for increased gene expression.

Increased cell proliferation can be seen as one of the prerequisites for cancer promotion. With regard to RF-radiation some effects were again found in some, but certainly not in all, investigations. Furthermore, when effects were found they showed

either *increased* or *decreased* cell proliferation. As a result, no clear-cut evidence for an effect on cell proliferation was obtained so far.

- Long term cancer studies

Moulder et al. (1999) reviewed the scientific data with regard to long term cancer studies. Although one investigation (Repacholi et al., 1997) showed that mobile phone frequencies at moderate exposure levels increased the incidence of a certain type of blood cancer in genetically modified mice, the data are so far not convincing enough to conclude that these RF-fields are able to induce cancer.

- Immune system effects

Low level exposures were so far not able to provide evidence of immune system effects. If effects were found they invariably were related to high-level RF-fields.

- Effects on reproduction and proliferation

Effects were again found at thermal exposure levels. There is no indication so far that low-level exposure, as with mobile phones and their base stations may induce such effects (Verschaeve & Maes, 1998).

Epidemiology and other human studies

There are few epidemiological investigations that focus on mobile phones. Yet, there are already several investigations related to other RF-sources (e.g., Verschaeve, 1995; Elwood, 1999; Moulder et al., 1999). Most of these investigations concern cancer incidences and again, they are not convincing enough to conclude that there is a cancer risk in exposed humans. The overall picture is as for other investigations inconsistent. Furthermore, as stated in a recent report from the Health council of the Netherlands (2000), the quality of the studies is somewhat questionable, especially those where the correlation between RF-exposure and cancer appear to be the strongest. As quoted from this report *“none of the studies were carried out using subjects living near base stations. The most relevant studies concern possible effects due to living near radio and television towers. The most extensive studies were carried out in England and Australia. In both countries it was apparent from an initial, preliminary study that there might be a slight increase in the risk of leukaemia and several other forms of cancer within the immediate vicinity of the towers. However, according to more extensive studies, in Australia in a larger area around the transmitter complex and in England at additional transmitters sites, the previously found link did not exist”*. Thus, the epidemiological data do not indicate the existence of a possible link between exposure to radiofrequency electromagnetic fields and cancer. The same

holds true for other investigations on, e.g., the cardiovascular system or behavioural studies, etc. Effects are only evident in case of high-level exposures. As mentioned above, many persons claim that they are *hypersensitive* to electromagnetic fields in general, and mobile phone frequencies (e.g., from base station antennas) in particular. Several investigations were performed on such persons (e.g., Bergqvist & Vogel, 1997, COST244_{bis}, 1998, WHO, 2001). These investigations include so-called *provocation studies* as well as investigations on psychosocial/behavioural effects of EMF at typical environmental exposure levels. Investigators do recognise the severity of the symptoms but were not able so far to conclude that the “EMF-exposure” should be indicated as the real reason for the observed health effects. In some cases obvious and irrefutable symptoms were found in people living near a mobile phone base station that was not in operation yet! Others have symptoms at exposure levels below 0.3 V/m (900 MHz). This is extremely low (ICNIRP standards are at 42 V/m at the given frequency).

Conclusion on scientific research

Above literature review is very selective and incomplete but yet shows that the scientific evidence is so far inconclusive to conclude that RF-fields (as from mobile phone equipment) pose a health hazard to humans. There are a number of *positive* reports that merit further attention and therefore further investigations should certainly be performed. Some precautionary measures can be envisaged as to the exposure of people. The Stewart report for example suggests that measures should be taken to discourage young children from using a mobile phone too often.

Yet, there is no reason for paranoia and adoption of the *precautionary principle* should not be taken to the extreme. For the moment the ICNIRP guidelines (ICNIRP, 1998) are used as a standard in many countries. WHO also proposes adoption of these standards.

Present guidelines and exposure limits

The ultimate goal of the WHO-EMF project is to foster the development and adoption of universally accepted, scientifically based health standards limiting exposure to EMF. Before this goal can be achieved many intermediate steps must be taken. As an international health agency, WHO does not normally advise national authorities to set policies that go beyond established knowledge. Yet, within the declaration signed in London at the 1999 Third Ministerial Conference on Environment and Health, WHO was encouraged to take into account “the need to rigorously apply the precautionary principle in assessing risks and to adopt a more preventive, pro-active approach to hazards”. In the absence of any scientific consensus that a health hazard exists from RF-exposure at levels below international guidelines (ICNIRP), the threshold has not been met for triggering application of the Precautionary Principle, as provided by EC

guidelines. However, non-regulatory measures of a precautionary nature may be justified by the need to address public concerns. Thus national authorities are encouraged to:

-Adopt health-based guidelines that set limits for EMF exposure based on the established research results

-Adopt as a separate policy voluntary measures that address public concerns. These include, (a) improved risk communication and (b) co-ordinated research programs.

As a matter of fact many committees in the world have established exposure limits or proposed guidelines that do not differ very much from each other (e.g., ANSI⁵, IEEE⁶, ICNIRP⁷, EU⁸, Safety code 6⁹, etc.). This is not surprising as all use the same scientific data. Differences are only due to some differences in interpretation of the data, which cannot be very important. However, absolute safety is not guaranteed and it probably will never be possible to do so. This brings scientists and especially lay persons to consider many different scenarios on how to deal with the mobile phone technology resulting in a lot of pressure on (local) authorities with regard to implantation of base station antennas and implementation of safety standard. Many claim that the “precautionary principle” (Foster et al., 2000) should be implemented when setting standards, but they often use completely different definitions of this principle and hence, reach completely different conclusions with regard to what these standards should be. For this reason several authorities have adopted several standards that sometimes differ considerably from the “official” guidelines, as, e.g., the ICNIRP guidelines (ICNIRP, 1998).

An overview of some representative standards for radiofrequency fields, including mobile phone frequencies, is given in table 1. These standards may all be considered to be at least applicable to radiation from mobile phone base stations (radiation from the mobile phone handset is often dealt with separately). The ICNIRP rationale is basically that the lowest exposure level that gives proven biological effects occurs at a specific (electromagnetic energy) absorption rate (SAR) of 4W/kg. Therefore a safety factor of 10 (0.4 W/kg) is taken for professionally exposed subjects, and another safety factor of 5 (0.08 W/kg) for the general population. ICNIRP considers that these safety factors are sufficient for the protection of people. Above mentioned basic restrictions are met when the corresponding electric (V/m) or magnetic (A/m) field values and incident power (W/m^2) are not exceeded. At present about 25 countries, and WHO, adopt the ICNIRP guidelines but it is clear that others do not. ICNIRP and WHO are often criticised, essentially because they do not apply a “precautionary

⁵ <http://www.ansi.org/>

⁶ <http://www.ieee.org/>

⁷ <http://www.icnirp.de/>

⁸ Adoption of the Council Recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields 0 Hz - 300 GHz, document 9582/1/99 (06-07-99).

⁹ http://www.hc-sc.gc.ca/ehp/ehd/catalogue/rpb_pubs/99ehd237.pdf

principle". Much lower standards were adopted by e.g., Switzerland (4V/m at 900 MHz, but in certain circumstances only) or Luxembourg where the standard for base station antennas is 3V/m at 900 MHz. Some Eastern European countries still have their "old" very severe standards although many are at present reconsidering them. Some scientists and pressure groups are in favour of a standard as low as 0.6 V/m. Because of the sometimes very different standards in very adjacent regions (e.g., Vatican City and Rome) a lot of confusion and anxiety is created. That is one of the reasons why WHO is working towards a better (international) harmonisation.

REFERENCES

Bergqvist U., Vogel E. (1997) Possible health implications of subjective symptoms and electromagnetic field. A report prepared by a European group of experts for the European Commission; Arbete och Hälsa, 1997:19. Swedish National Institute for Working Life, Stockholm, Sweden. ISBN 91-7045-483-8.

Brusick D. (1998_a) Genotoxicity of radiofrequency radiation. In: Carlo G.L., ed., *Wireless Phones and Health*, Kluwer Academic Publishers, p. 91-98.

Brusick D., Albertini R., McRee D., Peterson D., Williams G., Hanawalt P., Preston J. (1998_b) Genotoxicity of radiofrequency radiation. *Environ. Molec. Mutagen.* 32, 1-16.

COST244_{bis} (1998) Proceedings from COST244_{bis} International Workshop on Electromagnetic Fields and Non-Specific Health Symptoms, Sept. 19-20, Graz, Austria.

De Pomerai D., Daniells C., David H., Allan J., Duce J., Mutwakil M., Thomas D., Sewell P., Tattersall J., Jones D., Candido P. (2000) Non-thermal heatshock response to microwaves. *Nature* 405, 417-418.

EC expert group (1996) Possible health effects related to the use of radiotelephones, European Commission expert Group (McKinlay A., Andersen JB, Bernhardt JH, Grandolfo M., Hossmann K.-A., van Leeuwen FE, Mild KH, Swerdlow AJ., Verschaeve L., Veyret B), pp. 140.

Elwood J.M. (1999) A critical review of epidemiological studies of radiofrequency exposure and human cancers. *Environ. Health Perspect.* 107, suppl. 1, 155-168.

Foster K.R., Vecchia P., Repacholi M.H. (2000) Risk management, science and the precautionary principle. *Science*, 288, 979-981.

Health council of the Netherlands : GSM base stations. The Hague: Health council of the Netherlands, publication nr. 2000/16E.

ICNIRP (1998) Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Physics Vol. 74, No 4, pp 494-522.

IEGMP: Independent Expert Group on Mobile Phones (2000) Mobile phones and health, UK Ministry of Health. Volledig rapport consulteerbaar op het web: <http://www.iegmp.org.uk/IEGMPTxt.htm>

Lai H., Singh N.P. (1995) Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 16, 207-210.

Lai H., Singh N.P. (1996) Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radit. Biol.* 69, 513-521.

Maes A., Collier M., Slaets D., Verschaeve L. (1996) 954 MHz microwaves enhance the mutagenic properties of mitomycin C. *Environ. Molec. Mutagen.*, 28, 26-30.

Maes A., Collier M., Verschaeve L. (2001) Cytogenetic effects of 900 MHz microwaves in human lymphocytes. *Bioelectromagnetics*, 22, 91-96.

Malyapa R.S., Ahern, E.W., Straube W.L., Moros E.G., Pickard, W.F., Roti-Roti J.L. (1997_a) Measurement of DNA damage after exposure to electromagnetic radiation in the cellular phone communication band. *Radiat. Res.* 148, 618-627.

Malyapa R.S., Ahern, E.W., Bi C., Straube W.L., LaRegina M., Pickard W.F., Roti-Roti J.L. (1997_b) DNA damage in rat brain cells after *in vivo* exposure to 2450 MHz electromagnetic radiation and various methods of euthanasia. *Radiat. Res.* 149, 637-645.

Moulder J.E., Erdreich L.S., Malyapa R.S., Merritt J., Pickard W.F., Vijayalaxmi (1999) Cell phones and cancer: what is the evidence for a connection? *Radiation Res.* 151, 513-531.

Preece A., Iwi G., Davies-Smith A., Wesnes K., Butler S., Lim E., Varey A. (1999) Effect of a 915 MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man. *Int. J. Radiat. Biol.*, 75, 447-456.

Repacholi M.H., Basten A., Gebski V., Noonan D., Finnie J., Harris A.W. (1997) Lymphomas in Eμ-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields, *Radiation Res.*, 147, 631-640.

Salford L.G., Brun A., Stureson K., Eberhardt J.L., Persson B.R. (1994) Permeability of the blood-brain barrier by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50 and 200 Hz. *Microsc. Res. Tech.* 27, 535-542.

Sund, K.G., and Carlo, G.L. (1997). *Wireless Technology Research 1995 SRA Symposium.* *Hum. Ecol. Risk Assess.* 3, 1-117 (special issue).

Verschaeve L. (1995) Can non-ionizing radiation induce cancer? *Cancer J.* 5, 237-249.

Verschaeve L. (1998) Some considerations on the genotoxicity of radiofrequency radiation. In: Carlo G.L., ed., *Wireless Phones and Health*, Kluwer Academic Publishers, p. 99-103.

Verschaeve L., Maes A. (1998) Genetic, carcinogenic and teratogenic effects of radiofrequency fields. *Mutation Res.* 410, 141-165.

WHO (2001) Electromagnetic fields and public health: electromagnetic hypersensitivity. Fact Sheet, in preparation.

900 MHz

	W/kg	V/m	A/m	W/m²	Rationale	Comments
ICNIRP 1998	0.08	41.25	0.111	4.5	ICNRP (1998)	
ITALY Decreto 381 <i>Quality goals</i>		20 6	0.05 0.016	1 0.1	?	For fixed sources
GERMANY 26 th BImSchV		41.25	0.111		ICNIRP guidelines	For fixed installations. A specific compliance testing procedure has had to be applied to all fixed transmitter stations since 1.7.1992
BELGIUM Royal decree, 29-4-2001		20.6		1.12	ICNIRP + precautionary principle	For fixed antennas
EUROPE EMF recommendations	0.08	41.25	0.111	4.5	ICNIRP, Scientific Steering Committee	No directive but the recommendation form the legal basis in many member states
USA FCC report and order 96-326	0.08			6	ANSI/IEEE C95.1-1992, NCRP Report 1986	
Canada Safety code 6	0.08	47.55	0.126	6	Rationale EHC 137, ICNIRP, ANSI/IEEE C95.1-1992, Canadian Expert Group	Includes siting and installation guidelines, safety procedures for operators and maintenance personnel, warning signs.

Table 1a: Standards for exposure to mobile phone frequencies at 900 in a number of representative countries.

1800 MHz

	W/kg	V/m	A/m	W/m²	Rationale	Comments
ICNIRP 1998	0.08	58.33	0.156	9	ICNRP (1998)	
ITALY Decreto 381 <i>Quality goals</i>		20 6	0.05 0.016	1 0.1	?	For fixed sources
GERMANY 26 th BImSchV		58.33	0.156		ICNIRP guidelines	For fixed installations. A specific compliance testing procedure has had to be applied to all fixed transmitter stations since 1.7.1992
BELGIUM Royal decree, 29-4-2001		29		2.25	ICNIRP + precautionary principle	For fixed antennas
EUROPE EMF recommendations	0.08	58.33	0.156	9	ICNIRP, Scientific Steering Committee	No directive but the recommendation form the legal basis in many member states
USA FCC report and order 96-326	0.08			10	ANSI/IEEE C95.1-1992, NCRP Report 1986	
Canada Safety code 6	0.08	61.4	0.163	10	Rationale EHC 137, ICNIRP, ANSI/IEEE C95.1-1992, Canadian Expert Group	Includes siting and installation guidelines, safety procedures for operators and maintenance personnel, warning signs.

Table 1b: Standards for exposure to mobile phone frequencies at 1800 MHz in a number of representative countries.

Les systèmes de communication mobile : Principes et technologies

Benoît Stockbroeckx et Bruno Clerckx

Hyperfréquences UCL
Bâtiment Maxwell
B-1348 Louvain-la-Neuve

RESUME

Les systèmes de communication mobile actuels aussi bien que ceux prévus dans un avenir proche mettent en œuvre deux techniques fondamentales : le réseau cellulaire et l'accès multiple. Le réseau cellulaire permet de couvrir l'intégralité d'un territoire au moyen d'une répartition spatiale de stations de base, d'assurer la proximité entre le mobile et la station de base et d'assurer la capacité demandée au système. L'accès multiple quant à lui permet à plusieurs utilisateurs mobiles présents dans une même cellule d'avoir accès simultanément à une même station de base. Trois techniques d'accès multiple sont actuellement utilisées : la répartition en fréquence, la répartition dans le temps et la répartition par le code. Les systèmes de communication mobile actuels et futurs se différencient sur base de leurs avantages par rapport aux autres, de leurs techniques propres, des puissances mises en œuvre, du niveau d'exposition des personnes qu'ils engendrent et de leur état de développement en Belgique. Ces systèmes sont : le GSM de base (GSM 900 et DCS 1800), le GSM étendu (HSCSD, GPRS et EDGE), la troisième génération (UMTS), les réseaux à destination des professionnels (TETRA) et le système de liaisons fixes sans fil à très hauts débits (WLL). La radio et la télédiffusion numériques terrestres sont en cours de déploiement. L'impact du déploiement de ces nouveaux systèmes sur le niveau d'exposition des personnes est évalué sur base de la densité de puissance et du champ électrique mais aussi sur base des composantes à très basse fréquence contenues dans les signaux de ces systèmes.

1. INTRODUCTION

L'émergence de systèmes commerciaux de communication mobile a pu être réalisée par la mise en œuvre à un faible coût de quelques principes et techniques bien connus. Parmi ceux-ci on peut en relever deux qui sont suffisamment généraux que pour être applicables aussi bien au système GSM qui est bien connu en Europe qu'aux autres standards existant partout dans le monde ou encore aux nouveaux systèmes en cours de déploiement ou sur le point de l'être. Il s'agit du réseau cellulaire et de l'accès multiple. Ces deux techniques sont présentées de façon descriptive sur base de leurs fonctions et des contraintes qui les lient à l'ensemble du système. Des systèmes actuels et futurs sont ensuite présentés au niveau des services pour lesquels ils ont été conçus et au niveau technique. Enfin l'impact du déploiement de tous ces systèmes sur l'exposition du public aux champs électromagnétiques hyperfréquences est quantifié par le champ électrique maximum qu'il engendre. Un aperçu est donné au sujet de la question des composantes à très basse fréquence contenues dans les signaux de ces systèmes.

Étant donné le cadre dans lequel s'insère cet article, des données qualitatives ou quantitatives concernant l'exposition des personnes apparaissent à plusieurs endroits.

2. PRINCIPES DU RESEAU CELLULAIRE

L'utilisateur d'un système mobile doit pouvoir accéder à ce système où qu'il soit dans un territoire donné. Si on ajoute à cette exigence une contrainte de proximité entre l'utilisateur et la station de base on comprend facilement la nécessité de discrétiser le territoire en cellules dont le rayon est le rayon maximum permettant de satisfaire cette contrainte. La nécessité de proximité vient du fait que, pour qu'un terminal soit portable et présente une autonomie suffisante, il doit pouvoir joindre la station de base en émettant une puissance radio la plus faible possible. Le rayon maximum d'une cellule est donc fixé par un compromis entre la puissance émise par le portable qui doit être faible et le nombre de stations de base qui ne doit pas être trop grand. Dans le cas du standard GSM, la puissance maximale émise par le portable est de deux watts. On peut considérer qu'avec une telle puissance le rayon maximum des cellules est de 5 à 10 kilomètres en fonction des obstacles qui peuvent exister. On comprend alors aisément qu'une telle puissance n'est pas nécessaire et pourrait donc être économisée lorsque l'utilisateur se trouve à proximité de la station de base ou en vue directe de celle-ci. Le standard GSM prévoit à cet effet un contrôle automatique de la puissance émise par le portable. Ainsi elle varie de 0.2 à 2 watts en fonction des conditions de propagation. C'est la raison pour laquelle l'utilisateur désireux de limiter l'exposition de son corps aux champs électromagnétiques a tout intérêt à utiliser son portable dans des conditions telles que la propagation soit optimale. L'écran du terminal prévoit un affichage qui permet de s'en faire une bonne idée.

Le réseau cellulaire permet donc d'assurer la couverture territoriale tout en assurant la proximité entre le portable et la station de base. Une troisième fonction consiste à assurer la capacité. Une station de base doit pouvoir gérer simultanément toutes les communications en cours dans la cellule qu'elle couvre. Pour ce faire la station de base doit être équipée du nombre de canaux qui lui permet de satisfaire à la demande en capacité. Les canaux constituent donc la ressource qui permet de construire le réseau. Il faut alors constater que, d'une part, le nombre de canaux est limité et que, d'autre part, deux cellules qui utilisent un même canal doivent être suffisamment espacées pour éviter les problèmes d'interférence. Les canaux doivent donc être utilisés de façon parcimonieuse. Pour illustrer ce que peut être une utilisation parcimonieuse des canaux prenons le cas d'une station de base devant couvrir une cellule de 500 mètres de rayon centrée sur la Place de la Monnaie à Bruxelles. Cette station de base doit satisfaire une demande en capacité très importante étant donné la densité des usagers présents dans la cellule. Il se fait cependant que les usagers sont concentrés sur une surface qui ne représente qu'une petite fraction de la surface de la cellule toute entière : une bonne partie de la Rue Neuve, la Place de Brouckère, la Grand-Place les boulevards etc. Équiper cette station de base avec le nombre de canaux nécessaires pour satisfaire à la demande épuiserait la ressource canal au détriment des cellules voisines. La solution adoptée dans ce genre de situation consiste à installer plusieurs petites stations de base qui vont chacune couvrir une cellule dont le rayon n'excède pas 100 mètres. Celles-ci sont appelées micro-cellules. Ce sont alors ces micro-cellules qui permettent d'absorber la demande locale en capacité alors que la cellule de 500 mètres de rayon, appelée macro-cellule, absorbe la demande beaucoup plus faible qui est présente dans les zones non couvertes par les micro-cellules. La figure 1 résume ce principe.

Il existe en fait 4 niveaux cellulaires. Le premier est la cellule parapluie qui est destinée à couvrir une zone très étendue au moyen d'une seule station de base. Ce type de cellule a été utilisé par Belgacom Mobile dans les premiers mois d'existence de son réseau Proximus : une cellule parapluie couvrait alors la Ville de Bruxelles. Les campagnes du Sud du pays sont encore couvertes par des cellules parapluie étant donné la faible densité d'usagers. Le deuxième niveau cellulaire est celui de la macro-cellule. Il sert à couvrir un quartier ou un village. C'est le type de cellule le plus courant en Belgique. Le troisième niveau est la micro-cellule qui couvre une rue très fréquentée ou une place publique. De nombreuses villes en sont actuellement équipées. Le

quatrième niveau cellulaire est la pico-cellule. Il est destiné à couvrir un étage d'un immeuble, une salle ou une station de métro. Ce type de cellule est en train de se répandre en Belgique à la demande d'entreprises privées qui désirent garantir la couverture et la capacité à leurs employés ou à leurs visiteurs.

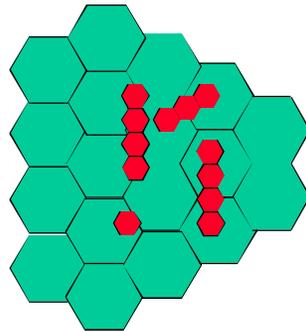


Figure 1. Agencement de macro-cellules et micro-cellules pour assurer à la fois la couverture et la capacité dans une zone à forte densité d'utilisateurs.

La densité d'utilisateurs est directement liée à la densité de population à un moment donné. Si on se place à un endroit donné, la densité d'utilisateurs a augmenté de façon exponentielle depuis l'arrivée du GSM. Si on se situe à un instant donné, la distribution spatiale de la densité d'utilisateurs est quasi-proportionnelle à la distribution spatiale de la densité de population.

Les notions présentées ci-dessus permettent de dire que plus une zone est densément peuplée, au plus la demande en capacité est importante et donc au plus les cellules sont nombreuses et de petite taille. Il en découle alors que la puissance émise par chacune des stations de base diminue avec la densité d'utilisateurs et que la hauteur de placement des antennes diminue également. La hauteur typique d'installation d'une antenne de macro-cellule est de 20 à 35 mètres alors qu'elle est de 2 à 4 mètres pour une antenne de micro-cellule. Le résultat global est alors une augmentation du niveau d'exposition du public avec l'augmentation de la densité d'utilisateurs. Ce raisonnement est résumé de façon qualitative dans la figure 2. Il est intéressant de noter à ce propos que la Belgique est le deuxième pays européen pour sa densité de population, après les Pays-Bas.

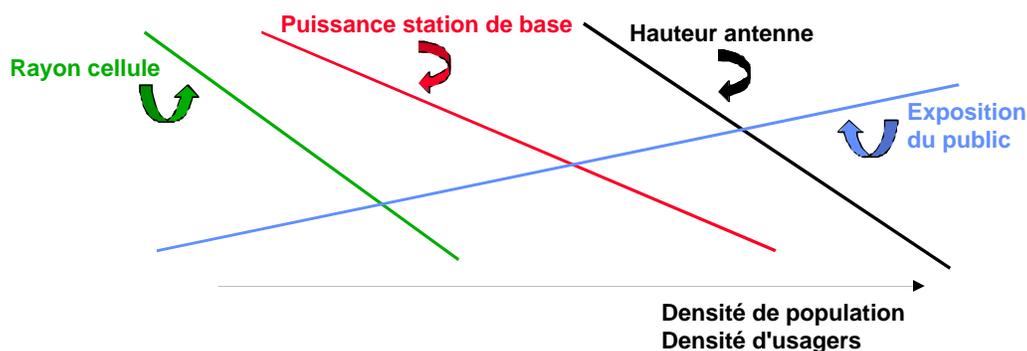


Figure 2. Représentation qualitative de l'effet de l'augmentation de la densité d'utilisateurs sur la taille des cellules, la puissance émise par les stations de base, la hauteur de placement des antennes et le niveau d'exposition du public.

3. TECHNIQUES D'ACCES MULTIPLE

Une station de base doit pouvoir distinguer les signaux qui lui sont envoyés simultanément par plusieurs mobiles. L'accès multiple est le moyen par lequel plusieurs utilisateurs peuvent communiquer simultanément avec une même station de base. Pour réaliser cet accès multiple il faut répartir les différents utilisateurs au niveau du signal qu'ils émettent. Il existe actuellement trois techniques de répartition utilisées dans les systèmes de communication mobile : la répartition en fréquence, la répartition dans le temps et la répartition par le code.

La répartition en fréquence (*FDMA* en anglais pour *Frequency Division Multiple Access*) consiste à assigner une fréquence porteuse à chaque utilisateur, ceux-ci émettant tous en même temps. Cette assignation de fréquence, similaire à ce qui est fait pour répartir dans le spectre les programmes de radio et de télévision, est illustrée à la figure 3. La station de base effectue alors la séparation par filtrage fréquentiel. Cette technique d'accès multiple convient tant aux systèmes numériques qu'aux systèmes analogiques.

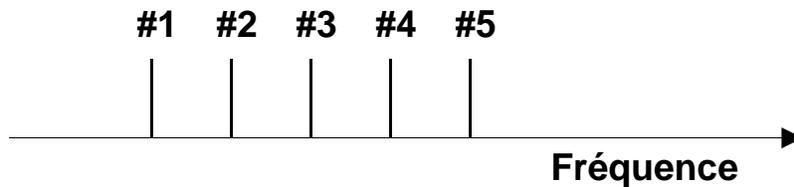


Figure 3. Répartition en fréquence (FDMA) de cinq utilisateurs.

La répartition dans le temps (*TDMA* en anglais pour *Time Division Multiple Access*) consiste à assigner une fenêtre temporelle (*time slot*) à chaque utilisateur. Ceux-ci émettent donc tous à la même fréquence mais à des instants différents. On peut voir cette technique comme une application du principe qu'il ne faut pas tous parler en même temps. La figure 4 illustre l'idée. L'émetteur comprime une partie de la conversation dans un rapport égal au nombre de fenêtres temporelles prévues par le système et émet dans la fenêtre temporelle qui lui a été assignée. Le récepteur se synchronise sur l'émetteur, décompresse le message et le restitue. Cette technique ne s'applique en général qu'aux systèmes numériques.

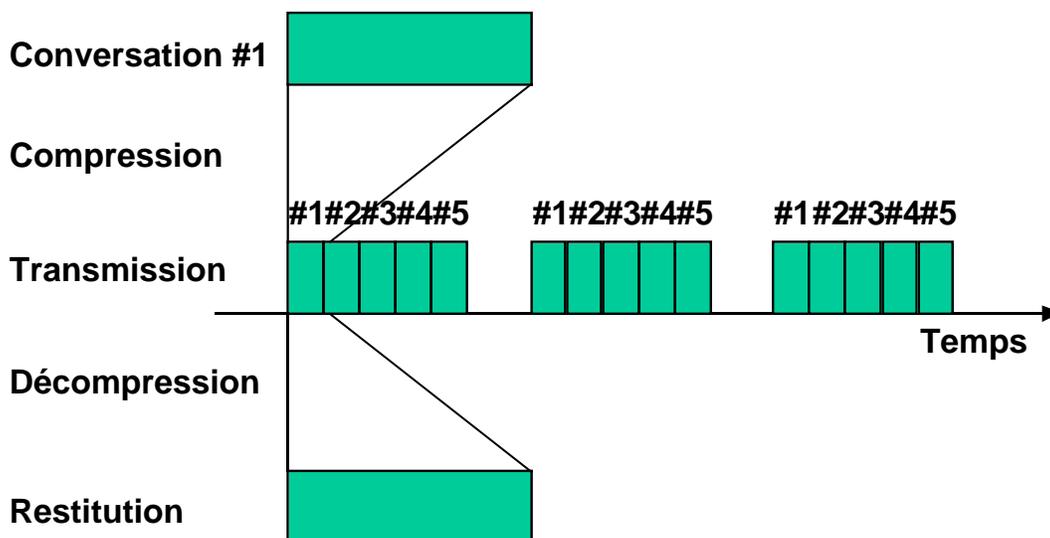


Figure 4. Répartition dans le temps (TDMA) de cinq utilisateurs.

La troisième technique est la répartition par le code (*CDMA* en anglais pour *Code Division Multiple Access*). Elle est plus récente, moins connue et plus difficile à comprendre que les deux autres. Pour la présenter il convient d'introduire la notion de symbole. Elle est liée à la notion de bit via le schéma de modulation. Dans un schéma de modulation numérique simple comme par exemple la modulation de phase à deux états, un seul bit d'information produit un symbole à la sortie du modulateur. Dans des schémas plus complexes comme des modulations à 4 ou 8 états de phase, ce sont respectivement 2 et 3 bits d'information qui produisent un symbole à la sortie du modulateur. La répartition par le code consiste alors à assigner un code de N bits à chaque utilisateur. Les bits de ce code sont appelés "chips". La durée de ce code est égale à la durée d'un symbole en sortie du modulateur et le code multiplie les symboles du message comme illustré à la figure 5. Comme tous les codes sont mathématiquement orthogonaux entre eux, la station de base peut effectuer la séparation par synchronisation et corrélation. Étant donné que le code présente un débit N fois plus grand que le message il y a une augmentation par un facteur N du débit à transmettre par radio et donc un élargissement de la bande passante nécessaire. C'est la raison pour laquelle on parle d'accès multiple à répartition par le code et à spectre étalé (*W-CDMA* en anglais pour *Wide-band Code Division Multiple Access*) quand N est grand. On peut donner une explication intuitive à cette technique en la comparant à faculté qu'a notre cerveau d'isoler et comprendre un message exprimé dans une langue connue même s'il est noyé dans un bruit ambiant.

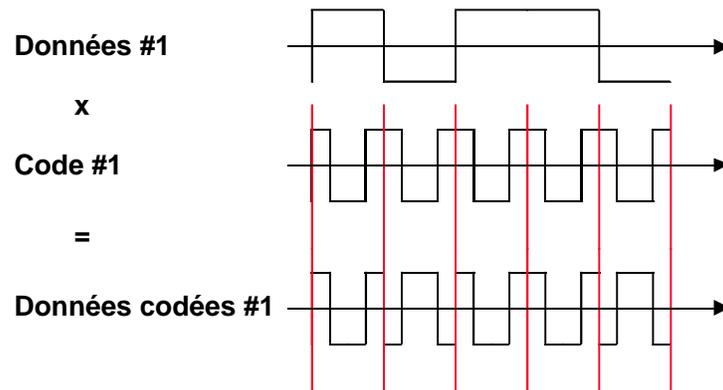


Figure 5. Répartition par le code (CDMA).

Les trois techniques passées en revue sont résumées dans le graphe de la figure 6. Elles peuvent être utilisées isolément ou en parallèle. Le standard GSM par exemple prévoit 8 fenêtres temporelles par fréquence porteuse. C'est donc une combinaison de *TDMA* et de *FDMA*. Chaque fréquence porteuse (canal) permet donc de gérer 8 communications simultanées pour une puissance rayonnée égale à P . Une station de base équipée de N canaux gère $N \times 8$ communications en émettant une puissance totale égale à $N \times P$. Le standard UMTS quant à lui prévoit une combinaison de *W-CDMA* avec du *TDMA* ou du *FDMA*.

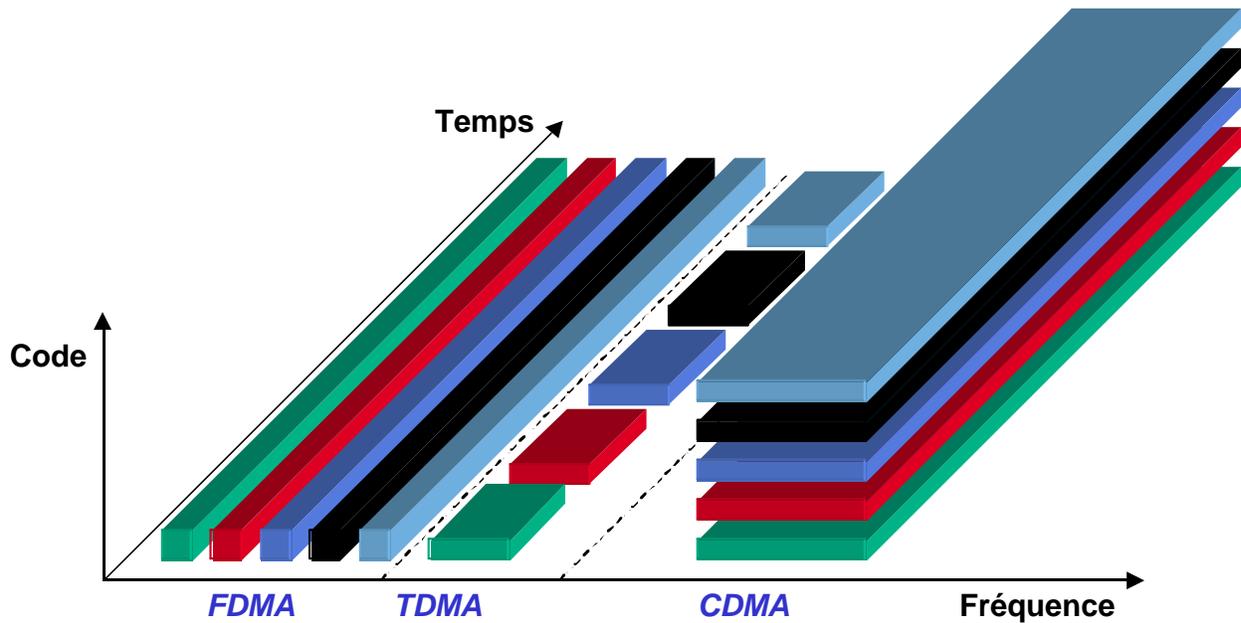


Figure 6. Graphique à trois dimensions synthétisant trois techniques d'accès multiple : FDMA, TDMA et CDMA.

4. SYSTEMES ACTUELS ET FUTURS [1]

4.1. GSM de base

Le GSM est le standard qui a popularisé les techniques de communication mobile. Ce standard et ses équivalents implantés dans les autres régions du monde (le GSM est essentiellement européen) sont classiquement regroupés sous la dénomination de systèmes de communication mobile de la deuxième génération (2G). La première génération étant celle des systèmes analogiques tels que MOB I et MOB II en Belgique.

Le standard GSM a été conçu dès le départ avec le but à peu près unique de transmettre la voix. Cela s'est traduit par un certain nombre de choix qui en limitent actuellement son utilisation à des fins de transmission de données ou de navigation sur Internet. Parmi ces choix on peut en relever trois qui sont tout à fait essentiels. L'accès multiple est réalisé par l'assignation d'une seule fenêtre temporelle à chaque utilisateur et ce quel que soit le taux d'utilisation de la station de base. Cette dernière est donc rarement utilisée à pleine capacité. La commutation, qui permet de mettre en contact deux utilisateurs, est orientée ligne (*circuit switching*) comme dans le cas de la téléphonie fixe. Cela consiste à réserver exclusivement l'usage d'une "ligne", qu'elle soit radio ou câblée, à une seule communication entre deux terminaux et ce quel que soit le taux d'utilisation de cette ligne durant une communication. On sait en effet que, durant une conversation téléphonique, une "ligne" n'est utilisée qu'à moins de 50% de sa pleine capacité. Enfin les concepteurs du système ont opté pour une modulation à 2 états de phase de la porteuse ce qui limite le nombre de bits par symbole transmis à un seul. Le résultat de ces choix est un débit d'environ 9.6 kbit/s avec un taux d'erreur binaire (*BER* en anglais pour *Bit Error Rate*) pouvant monter jusqu'à 10^{-3} , c'est à dire 1 bit erroné sur 1000 bits transmis soit encore 9 à 10 bits erronés par seconde. De telles performances sont parfaitement suffisantes pour transmettre de la voix mais pas pour transmettre des données de façon confortable et fiable.

Ce standard GSM de base est bien implanté en Belgique avec un opérateur fonctionnant à 1800 MHz et deux opérateurs fonctionnant dans deux bandes de fréquence : 900 et 1800 MHz. Belgacom Mobile et Mobistar ont commencé leur déploiement dans la bande des 900 MHz. Le

nombre de canaux à se partager y étant limité à 124 et pour satisfaire à l'augmentation de la demande en capacité ils ont commencé à déployer, il y a deux ans à peu près, dans la bande des 1800 MHz où 375 canaux sont disponibles. Parallèlement KPN-Orange Belgium a acquis une licence d'exploitation pour la bande 1800 MHz.

4.2. GSM étendu

Le GSM de base étant déployé les concepteurs ont cherché à en étendre les possibilités en vue d'offrir des services autres que la transmission de la voix : transmission de données et navigation confortable sur Internet. C'est ainsi qu'ont été définis des standards d'extension tels que *HSCSD*, *GPRS* et *EDGE*. Ces standards ont été élaborés dans le but d'octroyer aux réseaux GSM existants la possibilité de transférer des données avec un débit proche de celui des systèmes de troisième génération (3G) tels que l'UMTS. C'est ainsi que certaines personnes parlent de la génération "deux et demi" (2.5G).

HSCSD [2] (*High-Speed Circuit-Switched Data*) est un standard qui permet à l'utilisateur de bénéficier de plusieurs fenêtres temporelles (*time slots*) pour ainsi augmenter le débit de transmission qui passe alors de 9.6 à 64 kbit/s. *GPRS* [3] (*General Packet Radio Service*) est un protocole de communication standard qui permet la commutation par paquets à la place d'une commutation par ligne. La commutation par paquets consiste à regrouper les données pour les envoyer ensemble à certains instants et ainsi libérer la ligne pour d'autres utilisateurs aux autres instants. La capacité de la ligne est ainsi mieux utilisée. De plus il n'est pas nécessaire de facturer un temps de connexion au client, seule la quantité d'informations transférées quantifie l'usage qui est fait du système. Ce protocole de commutation par paquets est utilisé pour les connexions à Internet. *GPRS* permet donc à un utilisateur GSM de se connecter à des réseaux du type Internet. La combinaison des standards *GPRS* et *HSCSD* permet d'obtenir des débits de transmission de 115 à 177 kbit/s. *EDGE* [2] (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) applique un schéma de modulation de la porteuse radio à 8 états de phase ce qui porte le nombre de bits par symbole transmis à 3 au lieu de 1 pour le GSM de base. Le résultat net est une multiplication par 3 du débit de transmission accessible au terminal portable. La combinaison des standards *EDGE*, *GPRS* et *HSCSD* permet ainsi un débit de transmission maximum de 384 kbit/s.

Pour introduire ces standards dans son réseau l'opérateur doit modifier en partie l'électronique installée dans les stations de base. Il ne doit rien modifier au niveau des antennes. L'utilisateur désireux de profiter de ces standards doit de son côté acquérir un portable compatible avec ceux-ci. L'impact intrinsèque de l'application de ces standards sur le niveau d'exposition des personnes est nul. Il faut cependant noter que, en le mettant en œuvre dans son réseau, l'opérateur espère augmenter le temps de connexion des utilisateurs. Il en résultera alors nécessairement une augmentation de la puissance installée et donc une augmentation du niveau d'exposition des personnes. Notons encore que les standards *HSCSD* et *GPRS* permettent d'augmenter le taux d'utilisation des ressources installées, les stations de base fonctionneront donc à leur puissance maximale pendant un pourcentage du temps plus important.

Ces trois standards sont en cours de déploiement. Il faut noter que le GSM ainsi étendu et l'UMTS seront concurrents dans les grandes agglomérations et complémentaires sur l'ensemble d'un territoire. Ceci laisse penser que le GSM étendu va retarder et est susceptible d'hypothéquer le succès commercial de l'UMTS.

4.3. UMTS

L'industrie vise actuellement à mettre en place la convergence entre les systèmes mobiles et les applications nécessitant des transmissions de données. Cela est en passe d'être réalisé au moyen

de technologies de radiocommunication capables de supporter des transmissions à haut débit et des services multimédia de bonne qualité. Ces nouveaux systèmes sont regroupés au niveau mondial sous l'appellation IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications*) et en Europe sous l'appellation UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Systems*). Ces nouveaux systèmes constituent la troisième génération (3G) de communication mobile. Ce saut de génération est justifié par les changements dans la qualité des services rendus. L'objectif principal de la deuxième génération était de rendre mobile la téléphonie vocale. Les objectifs de la troisième génération vont bien au-delà.

- Les possibilités de véhiculer des données sur une large bande permettent la transmission de toutes sortes de contenus tels que le son à haute fidélité, des images fixes et mobiles ainsi que de grandes quantités de données notamment pour l'accès à Internet. Ces possibilités permettront l'accès au moyen d'un poste mobile à des services qui nécessitent actuellement un poste fixe. Elles sont également susceptibles de générer de nouveaux services.
- Dès le départ, la troisième génération a été conçue avec une portée mondiale. Cela implique la possibilité d'avoir accès aux services indépendamment de la situation géographique.
- La troisième génération, éventuellement combinée au système de positionnement GPS, permettra de lier le contenu d'un service à la position du terminal portable : localisation d'agences bancaires, de restaurants, d'hôtels etc.
- En insérant une carte à puce dans le portable il sera possible de faire du commerce électronique mobile.

La vitesse de transmission qui sera accessible au terminal portable dépendra de l'éloignement par rapport à la station de base ainsi que des conditions de propagation. Elle sera en général de 384 kbit/s, elle descendra à 64 kbit/s lorsque les conditions seront mauvaises et montera à 2 Mbit/s dans de rares cas. Le débit atteint en général sera donc identique à celui offert par le système GSM étendu. Cette vitesse de transmission est essentiellement limitée par la puissance d'émission du portable UMTS qui sera de 125 à 250 mW. C'est cette contrainte qui explique la petite dimension des cellules.

Trois bandes de fréquence sont allouées en Belgique à l'UMTS terrestre : 1900 – 1980 MHz, 2010 – 2025 MHz et 2110 – 2170 MHz. L'UMTS par satellite est en projet, deux bandes lui sont réservées dans la même gamme.

L'influence du nombre d'utilisateurs sur la puissance émise par les stations de base est plus difficile à établir que dans le cas du GSM. Dans le système UMTS il n'est pas nécessaire d'ajouter des canaux pour répondre à la demande, comme cela se fait pour le GSM et le TETRA. La liaison entre la station de base et les portables se fait à la même fréquence pour tous les utilisateurs et pour toutes les stations de base. La gestion des interférences est alors faite, notamment, au moyen du contrôle de puissance. On peut donc s'attendre globalement à une augmentation de la puissance lorsque le nombre d'utilisateurs augmente mais avec une ampleur moindre que dans le cas du GSM pour lequel la dépendance est linéaire.

Certains économistes [4], experts dans le domaine, laissent planer un grand point d'interrogation quant au succès commercial de l'UMTS. Le service à mettre en place nécessite des investissements très lourds, on peut donc se demander si l'utilisateur est prêt à en assumer le coût au vu des avantages offerts par rapport à un GSM évolué et bon marché. De leur côté les industriels n'envisagent le déploiement du système que pour les grandes villes. Leur intention est d'y offrir la troisième génération et de profiter de la génération 2.5 en dehors des grands centres urbains. Cette solution permet en effet à un opérateur 2G installé d'opérer également en 3G avec un investissement limité tout en continuant à rentabiliser son réseau initial. À court et moyen

termes (10 ans) il ne faut donc certainement pas s'attendre à une disparition du GSM suite à l'arrivée de l'UMTS.

La Belgique a vendu 3 licences UMTS pour une durée de 20 ans aux trois opérateurs GSM. Chacun des opérateurs est tenu de déployer son réseau suivant un calendrier déterminé en fonction de la population couverte : 30% de la population après 3 ans, 40% après 4 ans, 50% après 5 ans et 85% après 6 ans. Le réseau UMTS est cellulaire. La taille des cellules est plus petite que pour le GSM. Une estimation faite pour une ville moyenne montre qu'il faut 23 sites GSM pour couvrir 95% de la population sur 100 km² et qu'il en faut 55 pour couvrir 85% de la population en UMTS sur la même surface. Dans le cas de Bruxelles l'estimation est de 300 sites de 3 antennes par opérateur.

4.4. TETRA

Le standard TETRA (*TErrestrial Trunked RAdio*) est européen. Son objectif initial est de remplacer les grands réseaux PMR actuels. Les réseaux PMR (*Private Mobile Radio*) sont typiquement ceux utilisés par les services de police, d'incendie, de taxi, Touring Secours etc. Le standard TETRA est proche du standard GSM. Chaque canal *FDMA* (chaque fréquence porteuse) contient 4 fenêtres temporelles (*time slots*) au lieu 8 pour le GSM. Le réseau est cellulaire avec des tailles de cellules sensiblement supérieures à celles des cellules GSM. Les bandes de fréquence réservées au système TETRA sont aux environs de 400 MHz en Belgique.

Ce standard permet d'offrir essentiellement 2 services : la téléphonie et le dispatching. Le service de téléphonie est exactement le même que dans le cas du GSM, même si le but initial n'est pas de concurrencer ce dernier. Le service de dispatching constitue l'intérêt principal de TETRA. Il permet d'établir des communications entre un poste central et un groupe de terminaux mobiles afin de contacter simultanément toutes les personnes concernées par un même message. La définition des groupes d'appel peut de plus être dynamique : un terminal peut appartenir à un groupe à un moment donné dans la journée et à un autre groupe un peu plus tard, suivant les besoins liés à la coordination du travail. Le standard permet également la transmission de données par paquets (protocole *GPRS*). La transmission combinée de la parole et des données peut alors se faire à un débit de 28.8 kbit/s.

Une spécification du standard TETRA prévoit que le temps nécessaire entre la composition du numéro d'appel du correspondant et la mise en communication ne peut dépasser 300 millisecondes. Ce temps est à comparer à la dizaine de secondes qui est parfois nécessaire lorsqu'on appelle un abonné au GSM. Cette différenciation peut paraître minime à l'utilisateur privé. Elle est cependant d'une grande importance dans le cas d'un dispatching de taxis par exemple où le préposé donne parfois 6 à 7 appels par minute.

L'ETSI prépare actuellement le standard TETRA2 qui incorporera le standard *EDGE* et permettra des transmissions à 200 kbit/s. L'exploitation est prévue pour 2003. Il semble qu'alors TETRA2 rivalisera avec l'UMTS dans la niche de marché visée.

En Belgique le système TETRA sera exploité par deux opérateurs : la société ASTRID est mandatée par le gouvernement pour déployer un réseau réservé aux services de secours et la société Dolphin Telecom déploie un réseau européen à vocation commerciale.

ASTRID est une société de droit public qui a été mise en place par le gouvernement en vue d'installer en Belgique un réseau de communications mobiles réservé aux services de secours. Deux bandes de fréquence lui sont réservées : 380 – 385 et 390 – 395 MHz. Les utilisateurs de ce réseau sont essentiellement des administrations publiques : corps de police et de gendarmerie,

pompiers, protection civile, communes etc. Le réseau peut également être mis à la disposition d'entreprises semi-publiques et même privées : Croix Rouge, sociétés de gardiennage, transporteurs de fonds etc. Des conditions d'accès bien précises ont été définies pour éviter une concurrence déloyale avec le réseau commercial de Dolphin Telecom. Le réseau ASTRID est dimensionné pour 40 000 utilisateurs publics et un maximum de 30 000 utilisateurs semi-publics ou privés.

Les services offerts concernent essentiellement le dispatching. Les transmissions de données sont peu fréquentes chez les utilisateurs visés.

Le déploiement est en cours. La couverture complète de la Belgique nécessitera 350 sites. Le rayon moyen d'une cellule est de 10 à 15 km dans les zones rurales et 5 à 10 km en ville.

Une implantation classique est constituée d'une antenne omnidirectionnelle à l'émission et de deux antennes omnidirectionnelles à la réception. Les antennes sectorielles émettrices ne sont installées que très rarement. Chaque antenne est alimentée par 2 ou 3 canaux de maximum 25 W, soit un total maximum de 50 à 75 W avec un gain de l'ordre de 7 dBi.

ASTRID va également installer des répéteurs ou de véritables stations de base dans les milieux confinés : métro, tunnels, jonction Nord-Midi etc.

Le réseau ASTRID est dimensionné dès le départ pour une pleine capacité. A priori la puissance installée ne devrait donc pas augmenter avec le nombre d'utilisateurs.

La société Dolphin Telecom (DT) est actuellement le seul opérateur au monde à préparer ou exploiter un réseau commercial de communications mobiles suivant le standard TETRA. Cette société exploite déjà maintenant un tel réseau en Grande Bretagne. Le réseau belge devra entrer en service le 10 avril de cette année. Il fonctionnera dans la bande 415-420 MHz. Le marché visé est essentiellement constitué par les entreprises qui ont un besoin important en communications mobiles internes à l'entreprise. Ces entreprises sont actuellement confrontées à des factures GSM très importantes alors que les communications sont essentiellement internes. DT compte donc prendre des parts de marché aux opérateurs GSM dans cette niche bien précise.

DT a acquis des licences d'exploitation commerciale TETRA dans un grand nombre de pays européens. Le marché visé est tellement restreint qu'un réseau national ne se justifie pas économiquement sur un territoire comme la Belgique. Il serait à la limite de la rentabilité sur un territoire comme l'Allemagne. DT a donc décidé de gérer un réseau européen à partir d'une logistique centralisée en Belgique et en Allemagne.

DT prévoit d'avoir déployé 320 sites en Belgique à la mi-2003. À Bruxelles le territoire permet d'accepter 52 sites au maximum. Le rayon moyen d'une cellule y est actuellement de 1.5 km. Comme dans le cas du GSM, le nombre de sites et la puissance totale installée augmente avec le nombre d'utilisateurs.

Les deux réseaux TETRA auront pour effet, à terme, de supprimer un grand nombre de réseaux PMR. C'est surtout le cas pour le réseau ASTRID. L'estimation faite à ce sujet par cette société est la suivante : *"Chaque commune compte actuellement 4 à 5 antennes émettrices PMR (police, gendarmerie, pompiers, ambulances etc.) susceptibles d'être remplacées par le réseau ASTRID. Étant donné que la Belgique compte 589 communes cela donne un minimum de 2360 antennes PMR qui seront remplacées par les 350 antennes ASTRID."* On peut encore quantifier cet aspect en termes de puissance apparente installée (puissance installée multipliée par le gain des antennes). Les antennes PMR émettent généralement à 169 MHz (bande VHF) une puissance de l'ordre de 25 à 100 W avec un gain de l'ordre de 2 dBi. Cela donne une puissance apparente

installée en Belgique d'au moins 93 kW. Le réseau ASTRID vise à remplacer tous ces émetteurs par une puissance apparente installée maximale de 132 kW. On peut donc raisonnablement considérer que l'introduction du réseau ASTRID à la place des PMR n'ajoute pas de puissance supplémentaire. La répartition de cette puissance ne sera cependant pas la même puisqu'on compte actuellement au moins 4 antennes PMR par commune et que ASTRID va déployer en moyenne 2 sites pour 3 communes. Il y aura bien entendu une période de cohabitation entre les deux types de réseau. ASTRID estime que tous les utilisateurs fédéraux auront abandonné le PMR en 2005 et que les communes seront peut-être un peu plus réticentes à changer.

4.5. WLL

La boucle locale radio (*Wireless Local Loop*) est un système de télécommunication fixe destiné à relier par radio un ensemble de clients rassemblés dans un quartier à une station de base qui est elle-même un point d'entrée vers un réseau câblé. Ce système offre ainsi des liaisons à très haut débit en minimisant les travaux d'infrastructure chez le client. Il est en effet bien connu que l'installation d'une infrastructure câblée entre le dernier nœud du réseau et les clients qui veulent s'y connecter (*the last mile*) est particulièrement coûteuse par rapport à l'installation du reste du réseau. L'utilisation d'une liaison radio aux extrémités du réseau permet de réduire fortement ce coût et d'offrir en plus une configuration modulable (déménagement de l'antenne du client selon les besoins).

Trois bandes de fréquence ont été réservées au WLL. Les bandes centrées sur 3.5 GHz et 10.4 GHz permettent d'autoriser un maximum de deux opérateurs chacune dans une même zone. La bande centrée sur 25.5 GHz permet d'autoriser un maximum de quatre opérateurs dans une même zone. En Belgique, l'octroi des licences a été effectué en février 2001. Elles sont louées pour 1 année. Sur 11 candidats, 4 ont été retenus : BT, Mobistar, Telenet et Versatel.

Ce système de communication est fixe. La station de base est constituée de quatre antennes panneaux couvrant ensemble une cellule circulaire de 3 à 4 km de rayon. La station chez l'abonné est fixe. Il s'agit d'une antenne parabolique placée en vue directe de la station de base. Ce système est conçu pour des transmissions de données à très haut débit. Il peut aller jusqu'à 40 Mbit/s.

4.6. Radio et télédiffusion numériques

La radiodiffusion FM classique présente un certain nombre d'inconvénients : sensibilité aux conditions de propagation, changement de la fréquence pour un même programme quand on change de région géographique et peu de possibilités d'introduire de nouveaux services. Un standard de radiodiffusion numérique terrestre a été mis au point au niveau européen : le DAB-T (*Digital Audio Broadcasting – Terrestrial*).

En plus de la réception sans distorsion et d'un son de qualité CD, le DAB offre des avantages supplémentaires du type multimédia. Le DAB peut diffuser non-seulement du son mais aussi du texte, des images, des données et même de la vidéo. Il est ainsi possible d'écouter son programme de musique favori tout en lisant les paroles des chansons sur l'écran du récepteur ou de voir la photo de la personne interviewée.

Avec une puissance moindre, un émetteur DAB-T assure une couverture territoriale identique à celle d'un émetteur FM classique. De plus chaque émetteur peut transmettre simultanément plusieurs programmes. Les fréquences porteuses allouées pour Bruxelles sont aux alentours de 220, 224 et 226 MHz. L'objectif à long terme est de remplacer les émetteurs FM par des émetteurs DAB. Actuellement il en existe 2 à Bruxelles, l'un pour la communauté française et

l'autre pour la communauté flamande. Nous sommes donc actuellement au début de la période de transition qui connaîtra la coexistence des deux systèmes.

La télédiffusion numérique a pour objectif de fournir des programmes télévisés avec une qualité d'image et une définition supérieures à ce qui peut être obtenu avec les systèmes analogiques actuels. À cela s'ajoute également les possibilités d'interactivité. Au niveau européen, c'est le standard DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*) qui a été retenu.

Un émetteur permet de diffuser 4 à 6 programmes différents dans une bande de fréquence égale à celle d'un seul canal analogique classique. Les fréquences porteuses sont prises dans les canaux de la bande UHF (470 – 839 MHz) qui sont actuellement inutilisés. À Bruxelles les émissions vont débiter sur deux premiers canaux. Actuellement 21 autres canaux sont en projet et 5 canaux supplémentaires en avant-projet. Les puissances apparentes rayonnées annoncées sont de 5 à 10 kW.

L'objectif à long terme est de remplacer les émetteurs analogiques par des émetteurs DVB. Nous allons bientôt entrer dans la période de transition qui connaîtra la coexistence des deux systèmes.

4.7. Données techniques

Les données techniques principales des systèmes actuels et futurs sont présentées dans le tableau 1 [1]. Il est important de noter que ces données correspondent à une légère surestimation des puissances à installer. La principale raison est qu'il s'agit de puissances de crête et que les stations de base n'émettent pas à cette puissance en permanence. Ce sont néanmoins ces données qui ont été prises en compte pour évaluer l'impact du développement des nouveaux systèmes sur le niveau d'exposition public. Il est en effet communément admis dans ce genre de problématique qu'une surestimation raisonnable est préférable à un risque de sous-estimation. On constate dans ce tableau que la puissance mise en œuvre par l'UMTS est inférieure à celle du GSM, que celle du TETRA est comparable à celle du GSM et que celle du WLL est tout à fait négligeable.

Standard	Opérateur	Nbre antennes	P [W] par ant.	Gain max. [dBi]
GSM 900	Proximus	3	20	17
	Mobistar		10	
DCS 1800	KPN-Orange	3	4	18
	Proximus		10	
	Mobistar		4	
UMTS		3	1 ou 2	17
TETRA	ASTRID	1	75	7
	Dolphin Telecom	3	40	12.7
WLL (à 3.5 GHz)	Station de base	4	0.032	17
	Client	1	0.025	18

Tableau 1. Données techniques principales pour GSM 900, DCS 1800, UMTS, TETRA et WLL.

5. EXPOSITION DU PUBLIC

5.1. Introduction

L'exposition du public à un niveau ambiant de champs électromagnétiques hyperfréquences est généralement quantifié sur base de la densité de puissance S , exprimée en W/m^2 , ou de la valeur efficace du champ électrique E qui y correspond, exprimé en V/m . En vue d'éviter tout risque de

sous-évaluation de ces valeurs on considère en général que tous les émetteurs présents sur un site émettent en même temps à leur puissance de crête. Il en ressort une surestimation raisonnable.

Certaines études semblent indiquer que des effets biologiques apparaissent lorsque la porteuse micro-onde est modulée en amplitude à très basse fréquence alors qu'ils n'apparaissent pas quand la porteuse n'est pas modulée. Or certains systèmes modulent la porteuse micro-onde à très basse fréquence pour envoyer des signaux de synchronisation ou pour réaliser de l'accès multiple. Cet aspect particulier peut être quantifié par une identification de la fréquence de ces composantes et en comparant la puissance qu'elles véhiculent à la puissance moyenne.

Cette section présente d'une part les résultats principaux d'une étude qui avait pour objectif de déterminer l'impact du déploiement des nouveaux systèmes de communication mobile sur le niveau d'exposition des personnes [1] et, d'autre part, les résultats principaux d'un travail de fin d'études portant sur les composantes à basse fréquence de certains systèmes de communication [5].

5.2. Impact des nouveaux systèmes

Sur base des données du tableau 1 et des résultats de campagnes de mesure menées par différentes organisations belges (IBPT [6], RUG [7], ISSeP [8] et FPMs - UCL [9][10]), l'impact des nouveaux systèmes a été évalué [1]. Cet impact a été quantifié de façon absolue pour obtenir le champ électrique maximum auquel la population sera soumise après le déploiement de ces systèmes et de façon relative sur la densité de puissance. Un exemple de résultat est celui du tableau 2, établi pour le cas de la Place Rogier à Bruxelles. La situation existante (SE) est établie sur base de mesures effectuées à cet endroit par l'IBPT auxquelles on a ajouté une installation GSM typique. Les mesures englobent la radiodiffusion FM, la télédiffusion et les émetteurs PMR. On constate que, même en surestimant l'impact des nouveaux systèmes, on n'arrive qu'à 6.8 V/m au total dans une zone à très forte densité d'utilisateurs.

	Contributions absolues max. sur E en V/m	Impacts relatifs moyens
Situation existante (SE)	4.1	•
SE + UMTS	6.2	47%
SE + TETRA	4.7	34%
SE + WLL	4.1	0.05%
SE + DAB-T	4.3	33%
SE + DVB-T	4.3	33%
TOTAL	6.8	147%

Tableau 2. Impacts absolus et relatifs de UMTS, TETRA, WLL, DAB-T et DVB-T sur la situation existante fin 2000 Place Rogier à Bruxelles.

Ce type d'estimation a été effectué sur une trentaine de points en région bruxelloise. Les impacts relatifs moyens sont donnés dans le tableau 3. On y distingue les zones situées en milieu urbain dense et en milieu semi-urbain étant donné qu'elles sont caractérisées par une densité d'utilisateurs différente. La situation existante correspond à la densité de puissance due aux réseaux GSM, système pour lequel la puissance installée est directement proportionnelle à la densité d'utilisateurs. Les nouveaux systèmes par contre lui sont moins liés, ce qui explique un impact relatif plus important dans les zones à faible densité d'utilisateurs que dans les zones à forte densité.

	Milieu urbain dense	Milieu semi-urbain
UMTS	34%	33%
TETRA	94%	340%
WLL	0.1%	0.2%
TOTAL	130%	370%

Tableau 3. Impacts relatifs moyens de UMTS, TETRA et WLL en milieu urbain dense et en milieu semi-urbain, en région bruxelloise.

On a par ailleurs évalué que, même en surestimant l'impact des nouveaux systèmes, on arrive à 3 V/m en 7 points sur 30 seulement et 6 V/m en 1 point sur 30 seulement.

Le cas de l'implantation d'antennes sur des façades de bâtiment ou des châssis de fenêtre mérite une attention particulière. Dans de pareils cas en effet des personnes peuvent séjourner de façon prolongée derrière les antennes, éventuellement à 1 ou 2 mètres de celles-ci. On a évalué sur base de mesures [9][10][11] que le champ électrique à l'intérieur du bâtiment (derrière l'antenne) est de 1 à 2 V/m pour 1 W émis par l'antenne. Sur cette base l'impact des différents systèmes a été évalué pour ce type d'implantation particulier. Les résultats sont donnés dans le tableau 4. Il faut noter que l'impact du TETRA a été évalué alors que ce type d'implantation est très peu probable pour ce réseau étant donné que les cellules sont grandes et que les opérateurs cherchent à placer leurs antennes le plus haut possible (sur le toit).

	Puissance émise par l'antenne [W]	Champ électrique [V/m]
GSM	20	4.5 – 8.9
DCS	4	2 - 4
UMTS	2	1.4 – 2.8
TETRA	40	6.3 – 12.6
WLL	0.032	0.18 – 0.36

Tableau 4. Champ électrique à l'intérieur (derrière l'antenne) lors d'implantations sur façades ou sur châssis.

On peut encore se demander quelle est la puissance qui peut être installée sur une façade ou sur un châssis en vue de respecter une limite d'exposition donnée derrière les antennes (les antennes sont alors supposées être regroupées sur quelques mètres carrés). Le tableau 5 donne la puissance installée maximale pour trois limites d'exposition. Ce tableau indique en fait une gamme de puissance puisque les mesures donnent une gamme de champ électrique (1 à 2 V/m) pour 1 W à l'antenne. Ainsi la norme belge de 21 V/m à 900 MHz permet d'installer 100 à 400 W sur une fenêtre ou une façade.

Limite d'exposition [V/m]	Puissance installée maximale [W]
3	2.3 à 9
6	9 à 36
21	110 à 440

Tableau 5. Puissance installée maximale sur une façade ou un châssis en vue de respecter un niveau d'exposition donné dans un local situé derrière les antennes.

5.3. Composantes à très basse fréquence

Les composantes à très basse fréquence (TBF) sont le résultat de la modulation en amplitude de la porteuse micro-onde à des fins de synchronisation ou d'accès multiple. Il s'agit donc de basses fréquences transposées à haute fréquence (à côté de la porteuse) par le mécanisme de modulation. Par TBF on entend des fréquences situées entre 1 et 200 voire 250 Hz. Un exemple typique est celui du signal émis par un portable GSM. Celui-ci doit émettre dans sa fenêtre temporelle et cesser d'émettre en dehors de celle-ci. Une fenêtre temporelle dure 577 μ s et une trame TDMA contient 8 fenêtres, elle dure donc 4.6 ms. Ainsi l'émission périodique de la porteuse micro-onde toutes les 4.6 ms introduit une composante TBF à 217 Hz.

Les composantes TBF de différents systèmes ont été mesurées [5]. La chaîne de mesure est composée d'une antenne, d'un amplificateur, d'une diode (détection quadratique équivalente à une démodulation) et d'un oscilloscope numérique. Les échantillons enregistrés par l'oscilloscope sont ensuite analysés par traitement numérique. Les principaux résultats sont donnés dans le tableau 6. On y trouve les fréquences des TBF ainsi que le rapport entre la puissance contenue dans ces TBF et la puissance moyenne du signal. Ce rapport permet de se faire une idée de l'importance de ces composantes d'un système à l'autre.

Systèmes	TBF observées	P_{TBF} / P_{moy}
Portable GSM	8.3 Hz	2.6 %
	217 Hz	179%
Station de base GSM (plusieurs canaux actifs)	217 Hz	0.9 %
Portable DECT (portable d'intérieur numérique)	100 Hz	166%
Télédiffusion analogique	50 Hz	0.3 %
DAB-T (radiodiffusion numérique)	10.4 Hz	0.02 %

Tableau 6. Fréquences des composantes TBF et rapport entre la puissance contenue dans ces composantes et la puissance moyenne du signal.

Il est important de noter que les effets biologiques liés à ces composantes TBF ne sont pas prouvés. En particulier ils nécessitent des mécanismes de démodulation (non-linéarités électriques) au sein des tissus. Ces mécanismes sont mal connus et même totalement inconnus dans le cas des faibles niveaux d'exposition. Ce sujet constitue cependant une voie importante de recherche.

6. CONCLUSIONS

Des principes et technologies des systèmes de communication mobile ont été présentés avec, en toile de fond, des informations qualitative et quantitative concernant l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques hyperfréquences.

On a vu comment un réseau cellulaire permet de couvrir un territoire tout en assurant la proximité entre la station de base et le mobile et comment l'utilisation de 4 niveaux cellulaires permet de prendre en compte l'inhomogénéité de la demande en capacité. Il a été montré qualitativement que le niveau d'exposition des personnes croît avec la densité de population et avec la densité d'utilisateurs.

Trois techniques d'accès multiple permettent de faire communiquer simultanément plusieurs mobiles avec une même station de base : répartition en fréquence, dans le temps et par le code.

D'autres systèmes que le GSM vont nécessiter le déploiement à grande échelle dans un avenir proche : UMTS, WLL, DAB-T et DVB-T. D'autres encore sont déjà en cours de déploiement : GSM étendu et TETRA. Il va résulter de ces déploiements un accroissement du niveau d'exposition du public de 130 à 370% au maximum. Le champ électrique ne dépassera pas 6 V/m malgré les déploiements prévus pour autant que les opérateurs prennent quelques précautions telles qu'éviter d'installer des antennes sur des façades ou des châssis de fenêtres.

Les composantes à très basse fréquence pourraient, à l'avenir, servir à affiner la quantification de l'exposition des personnes si leur pertinence est confirmée par la preuve d'effets biologiques spécifiquement liés à celles-ci.

7. REFERENCES

- [1] **B. Stockbroeckx et A. Vander Vorst**, "Évaluation de l'impact potentiel de la délivrance de licences de téléphonie mobile supplémentaires sur le champ électromagnétique", *Convention IBGE – UCL n°584/2, Rapport final complet*, février 2001, 48 pages.
- [2] **A. Furuskär**, J. Näslund and H. Olofsson, "Edge – Enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution", *Ericsson Review*, No. 1, 1999, pp. 28-37.
- [3] **H. Granbohm and J. Wiklund**, "GPRS – General packet radio service", *Ericsson Review*, No. 2, 1999, pp. 82-88.
- [4] **Ch. Dickey**, "The Cold Facts of Wireless. Grandiose visions of a third generation are coming unraveled", *Newsweek*, January 15, 2001, pp. 36-37.
- [5] **O. Moreau**, "Caractérisation des composantes TBF des signaux de communications et leurs effets biologiques éventuels", travail de fin d'études, UCL, Septembre 2001, 108 pages.
- [6] **IBPT**, Mesure des rayonnements émis par les stations de base GSM et mesure des rayonnements émis dans la bande 20 MHz – 2 GHz. Rapport de mesure à la demande de l'IBGE-BIM, juillet 2000.
- [7] **Christof Olivier et Luc Martens**, *Studie over "Standaardprocedure voor elektromagnetische veldmetingen"*. Convention IBGE-BIM / RUG-INTEC, rapport final, novembre 2000.
- [8] **Willy Pirard**, Champs électromagnétiques rayonnés par les antennes GSM installées sur l'église du Chant d'Oiseau à Bruxelles. Rapport de mesure, ISSeP, juin 2000.
- [9] **André Gérin et Benoît Stockbroeckx**, "Problématique de l'implantation de sites. Mesures des champs électromagnétiques", Rapport de mesures, FPMs – UCL, Décembre 1998.
- [10] **Benoît Stockbroeckx et André Gérin**, "Stations de base DCS 1800 : Mesures en champs proches", Rapport de mesures, UCL – FPMs, Mai 1999.
- [11] **Willy Pirard**, "Champs électromagnétiques à proximité des antennes-relais de mobilophonie", Rapport final, ISSeP, Mai 2000.

Samenvatting

De huidige en toekomstige mobiele communicatie middelen berusten op twee kenmerken: het vlak dekkend rooster en de veelvoudige toegang. Hiertoe moeten er genoeg antennes geplaatst worden om alle mogelijke gebruikers op te vangen. Tevens bij meerdere oproepen in eenzelfde bereik, moet het systeem ze allen kunnen behandelen. Veelvoudige en gelijktijdige toegang kan verzekerd worden door het verdelen over verschillende frequenties, per code of door verdelen in de tijd. Alle systemen hebben hun eigen kenmerken, voor- en nadelen. In België hebben we: de basis GSM (GSM 900 en DCS 1800); de GSM's zoals de HSCSD, GPRS en EDGE; de 3de generatie GSM (UMTS); de netten voor beroepsdoeleinden (TETRA) en de vaste draadloze verbindingssystemen met hoog debiet (WLL).

Digitale radio- en televisie distributies zijn zich aan het verspreiden. Hier wordt geacht , niet alleen op de veld dichtheid maar ook op de zeer lage frequenties die er voorkomen.

Summary

Present and future use of the mobilophone communication systems rest on two basic features: they should provide full area coverage and they should give access to simultaneous calls. To fulfil these requirements the network of antennas needs to be dense to avoid that users be left out. Multiplicity and simultaneity is granted using techniques such as, frequency slots, codifying, time splits All systems have characteristics of their own. Belgium has the basic GSM (GSM 900 and DCS 1800); the GSMs such as HSCSD, GPRS and EDGE; the 3rd generation GSMs (UMTS); the nets for professional usage (TETRA) and the fixed wireless links with high dataflux (WLL). Digital radio and television distribution are on the march. In this area there is a need to watch not only the field density but also the very low frequency components.

CONCLUSIONS DE L'ETUDE MENEES PAR L'ISSEP CONCERNANT LES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES A PROXIMITE DES ANTENNES RELAIS DE MOBILOPHONIE

W. Pirard

Chef de la Section Electronique Appliquée, ISSEP-Liège,

RESUME

L'augmentation du nombre d'utilisateurs de téléphones mobiles et l'arrivée de nouveaux opérateurs de télécommunications entraînent la multiplication d'antennes relais. Suite aux inquiétudes concernant les éventuels effets des champs électromagnétiques sur la santé, la Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE) du Ministère de la Région wallonne a confié, à l'ISSEP, une étude relative aux champs électromagnétiques au voisinage des antennes relais GSM. L'objectif principal était de comparer les résultats des mesures aux normes¹ ou recommandations. Cette étude, d'une durée d'un an, a débuté en mars 1999 et cet article présente un résumé des principales conclusions concernant les antennes directives qui sont les plus nombreuses. L'intégralité des résultats est également disponible dans le rapport final publié en mai 2000.

NORMES ET RECOMMANDATIONS

Dans les bandes de fréquences utilisées en téléphonie mobile, la plupart des normes et recommandations internationales sont fondées sur l'effet thermique. L'effet thermique produit une augmentation de la température des tissus et résulte de la forte teneur en eau du corps humain. La molécule d'eau, ainsi que celles constituant certains tissus, étant de type polaire, leur orientation tend à suivre celle du champ électrique, ce qui produit des frottements intermoléculaires, d'où une élévation de température. C'est ce principe qui est utilisé dans le four à micro-ondes, mais à un niveau de puissance nettement plus élevé que celui émis par un portable GSM.

Une seconde catégorie de recommandations concerne les effets dits "athermiques"; selon certains scientifiques, ces effets résulteraient d'une interaction directe avec les tissus et auraient, notamment, une influence sur le système nerveux. Sont souvent cités des symptômes subjectifs, tels que : problèmes de concentration, irritabilité, troubles du sommeil, fatigue, etc. Certaines études font également état d'effets sur l'œil, (dégénérescence tissulaire de la rétine, de la cornée et de l'iris), d'effets sur les systèmes de reproduction, cardio-vasculaire, immunitaire, hormonal ainsi que sur matériel génétique (ADN). Selon ces mêmes études, certains de ces effets apparaîtraient pour des niveaux d'exposition nettement plus faibles que

¹ Il faut toutefois préciser qu'il n'existe actuellement, en Belgique, aucune norme spécifique pour le rayonnement électromagnétique.

ceux produisant un échauffement significatif. Il faut toutefois ajouter que les recherches relatives aux effets athermiques conduisent souvent à des conclusions divergentes, ou non significatives. D'autre part, ces études se basent généralement sur des expérimentations réalisées sur des animaux ou des cultures de cellules. L'extrapolation des résultats à l'espèce humaine n'est pas toujours aisée, notamment du fait de la différence de taille et de constitution des cellules.

La plupart des recommandations nationales, ou internationales, basées sur l'effet thermique, imposent, dans le cas du public soumis à une exposition totale et continue, une densité de puissance inférieure à $4,7 \text{ W/m}^2$ (Watt par mètre carré) pour la bande de fréquence de 900 MHz (Mégahertz) qui est utilisée par PROXIMUS et MOBISTAR. Cette limite passe à 9 W/m^2 pour la fréquence de 1800 MHz utilisée par KPN-ORANGE. Ces valeurs sont imposées dans la recommandation de l'IRPA (International Radio Protection Association) et dans le projet de Directive Européenne (pr ENV 50166).

Plusieurs pays ont adopté des normes plus sévères visant à protéger les populations et les professionnels des effets athermiques. L'Australie et la Nouvelle-Zélande ont une norme commune, qui limite la densité de puissance à 2 W/m^2 . La norme de l'ex-U.R.S.S. impose, pour les fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz, une densité de puissance inférieure à 100 mW/m^2 (Milliwatt par mètre carré), dans le cas d'une exposition continue. Plus récemment, se basant sur le principe de précaution, l'Italie a adopté une limite 6 V/m (Volt par mètre), ce qui correspond à une densité de puissance² de 100 mW/m^2 . La Suisse a, quant à elle, publié une ordonnance limitant le champ à 4 V/m (soit 42 mW/m^2) et 6 V/m (soit 100 mW/m^2), respectivement dans les bandes de fréquence de 900 et 1800 MHz. Précisons qu'il s'agit, dans ce cas, d'une limite par installation ; l'exposition réelle est supérieure lorsque les champs provenant de diverses installations se recouvrent.

Certains scientifiques ou associations ont également rédigé des recommandations. En Belgique, le Professeur VANDER VORST et le Docteur STOCKBROECKX (Université Catholique de Louvain), ainsi que le Professeur GERIN (Facultés Polytechniques de Mons), ont proposé de limiter le champ électrique à 3 V/m , ce qui correspond à une densité de puissance maximale de 24 mW/m^2 . Les auteurs justifient ce choix par le fait qu'il n'existe pas, ou peu, d'effets nocifs recensés dans la littérature pour un tel niveau d'exposition³. Notons également qu'Inter Environnement Wallonie recommande une limite de 20 mW/m^2 , qui est pratiquement équivalente à 3 V/m .

La recommandation la plus restrictive est défendue par le Dr Neil CHERRY, Directeur de l'Unité de Recherche en Climatologie de l'Université de Christchurch en Nouvelle-Zélande et par le Professeur Roger SANTINI de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Laboratoire de Biochimie-Pharmacologie; ces deux scientifiques préconisent de limiter l'exposition à 1 mW/m^2 en moyenne sur une année. A l'opposé, les défenseurs du projet de Directive Européenne ou de la recommandation de l'IRPA, prétendent qu'il n'y a, actuellement et au vu des résultats des études déjà réalisées, aucune base scientifique solide pouvant justifier un abaissement des plafonds d'exposition.

² Les limites d'exposition sont, soit exprimées en densité de puissance (par exemple en mW/m^2), soit en champ électrique (en V/m). Pour autant que l'on se situe à quelques mètres de l'antenne, ces deux grandeurs sont liées entre elles par une relation simple.

³ A titre de comparaison, un portable GSM rayonnant une puissance de 2 W produit, à une distance de 2 m, un champ de 3 V/m .

Densité de puissance et champ maximum dans le cas d'une exposition totale du public selon plusieurs réglementations ou recommandations

Réglementations ou recommandations	Densité de puissance (mW/m ²)	Champ électrique (V/m)
Projet de Directive Européenne pr ENV 50166	4700 à 900 MHz 9000 à 1800 MHz	41,9 à 900 MHz 58,1 à 1800 MHz
Australie et Nouvelle-Zélande (1991)	2000	27,5
Italie, ex-URSS (1978)	100	6,1
Suisse (1999)	42 à 900 MHz 100 à 1800 MHz	4 à 900 MHz 6 à 1800 MHz
UCL – FPMs (Belgique, 1999)	24	3
Inter Environnement Wallonie (1998)	20	2,75
N.CHERRY (Nouvelle-Zélande, 1996) R. SANTINI (France, 1998)	1 (en moyenne sur 1 an)	0,6

Le tableau, ci-dessus, résume les limites d'exposition correspondant à diverses recommandations, applicables aux fréquences 900 et 1800 MHz. La deuxième colonne reprend la densité de puissance (exprimée en mW/m²) et la dernière colonne fournit le champ électrique correspondant (exprimé en V/m). On constate, qu'en ce qui concerne les densités de puissance, il y a entre les valeurs extrêmes, un rapport de 4700 à 900 MHz et de 9000 à 1800 MHz.

Précisons que l'étude confiée à l'ISSeP n'avait pas pour but d'émettre un avis sur la pertinence de ces différentes normes ou recommandations. En effet, une telle analyse est certainement prématurée au vu des nombreuses recherches en cours, initiées par l'OMS et l'Union Européenne. L'objectif essentiel des mesures était de connaître les niveaux de champ à proximité des antennes relais afin d'identifier les éventuelles "zones à risques". Dans la suite de cet article, nous comparons les résultats de nos mesures au seuil de 3 V/m, qui est assez proche de la limite adoptée en Suisse (pour 900 MHz) et qui est la plus restrictive en Europe. Dans un but de simplification, tous les résultats sont donnés en mW/m² et le seuil de 3 V/m a été converti dans la même unité, c'est-à-dire 24 mW/m² .

RESULTATS

De nombreuses mesures de champ ont été réalisées à proximité de tous les types d'implantations, c'est-à-dire sur pylônes, châteaux d'eau, ainsi que sur le toit ou les façades de bâtiments. De manière à garantir l'objectivité des résultats, les sites ont été choisis par l'ISSeP en concertation avec l'Administration de la Région wallonne. Les opérateurs n'ont été informés de ces choix qu'après que les mesures aient été réalisées.

Il est important de préciser que la puissance rayonnée par une antenne GSM dépend du nombre de conversations en cours dans la cellule; ce nombre est relativement faible pendant les périodes creuses et est presque nul pendant la nuit. A titre d'exemple, une antenne rayonnant deux fréquences à la puissance⁴ de 4 W émettra une puissance pouvant varier entre 0,5 et 8 W, suivant le nombre de conversations en cours. Tous les résultats, ou conclusions, présentés ci-après se rapportent au cas où l'antenne est utilisée à sa pleine capacité, ce qui

⁴ Ce cas est le plus fréquent. On trouve néanmoins des antennes rayonnant 4 ou 6 porteuses de 4 ou 5 W chacune.

correspond à une puissance totale de 8 W. Par conséquent, l'exposition moyenne sur une durée de 24 heures sera, forcément, inférieure. L'extrapolation des résultats à d'autres puissances peut se faire par simple calcul.

1) Champ dans le faisceau de l'antenne

Des densités de puissance supérieures à 24 mW/m^2 sont surtout observées dans le faisceau de l'antenne dont la figure 1 représente une coupe verticale. En pratique, l'essentiel du rayonnement est concentré dans un angle généralement compris entre 6 et 10° . Dans le plan horizontal, et dans le cas des antennes directives (qui sont les plus courantes), le faisceau couvre un angle de 120 à 180° , selon le type.

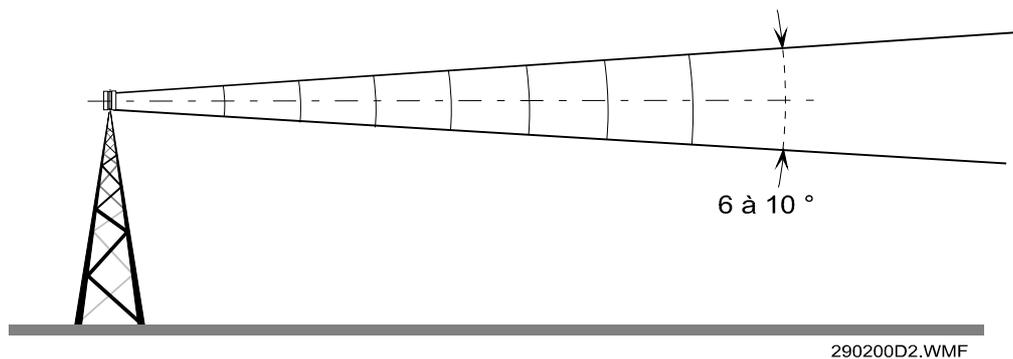


Figure 1 – Coupe verticale du faisceau d'une antenne

La figure 2 donne, à titre d'exemple, la densité de puissance mesurée à proximité d'un château d'eau sur lequel sont installées, à 24 m de hauteur, trois antennes d'un opérateur couvrant chacune un secteur de 120° . La courbe de la figure 2 représente la densité de puissance, mesurée à 3 m de hauteur, le long d'un parcours rectiligne d'une longueur de 550 m et dont le point de départ (abscisse 0 m) se trouve au pied du château d'eau ; ce parcours est situé au milieu d'un des secteurs de 120° (c'est-à-dire là où le champ est le plus élevé) et est en vue directe des antennes. Cette courbe correspond à la densité de puissance cumulée lorsque les trois antennes émettent 8 W chacune.

La figure 2 montre que le champ est très faible au pied du château et augmente lorsqu'on s'en éloigne. La densité de puissance atteint un maximum de l'ordre de 1 mW/m^2 entre 120 et 260 m, c'est-à-dire 24 fois moins que les 24 mW/m^2 pris comme référence. Ajoutons également que ce maximum ne concerne qu'un nombre de points assez limité. Ce résultat peut être aisément expliqué si on prend en compte les caractéristiques exactes du faisceau de l'antenne et, plus particulièrement, son diagramme de rayonnement. La partie hachurée, de la figure 3, représente la zone, devant l'antenne, où la densité est supérieure à 24 mW/m^2 ; cette zone a été déterminée par calcul en tenant compte des caractéristiques de l'antenne (puissance totale de 8 W, gain de 35, faisceau incliné de 4° par rapport à l'horizontale). La figure 3 indique que la densité est inférieure à 24 mW/m^2 au-delà d'une distance de 30 m et en dessous d'une hauteur de 21 m; ce simple exemple illustre l'importance de la hauteur de l'antenne, de la forme du faisceau et de son inclinaison. Nous reviendrons sur l'importance de ces différents paramètres dans nos conclusions. Notons toutefois que les calculs sont peu fiables dans la zone située à quelques mètres devant l'antenne (délimitée par un pointillé à la figure 3); cet aspect a fait l'objet de mesures spécifiques et est présenté au point 2 ci-dessous.

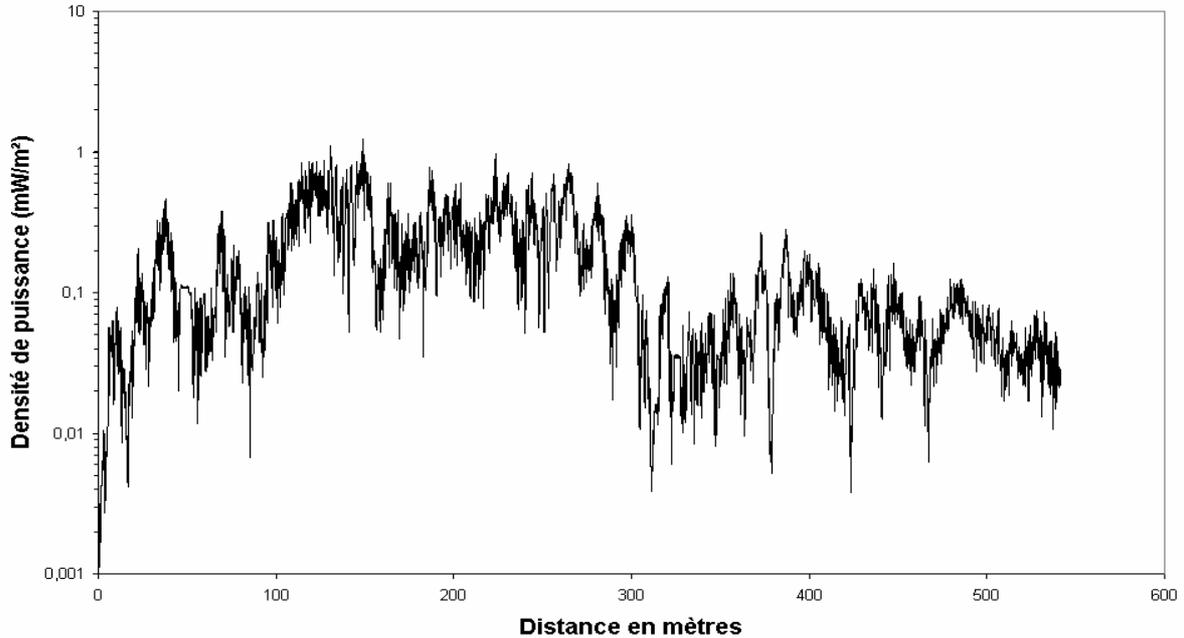


Figure 2 – Variation de la densité de puissance (en mW/m^2), à 3 m du sol, le long d'un parcours de 550 m (1^{er} opérateur)

Il faut également ajouter que lorsqu'on se trouve dans un bâtiment, les murs atténuent considérablement le rayonnement (la densité de puissance est réduite d'un facteur compris entre 5 et 10, selon le type de mur). Par conséquent, la densité de puissance, aux étages inférieurs des habitations, est encore beaucoup plus faible que ce qu'indique la figure 2.

La figure 4 représente la densité de puissance produite par trois antennes d'un second opérateur installées sur le même château d'eau. Le trajet de mesure est le même que celui de la figure 2. La valeur maximale atteinte pour cet opérateur est de $0,2 mW/m^2$. On notera que les maxima ne se produisent pas aux mêmes endroits que pour le premier opérateur. Cette différence de profil s'explique par le fait que le faisceau des antennes du premier opérateur est légèrement incliné, alors que celui des antennes du second est parfaitement horizontal.

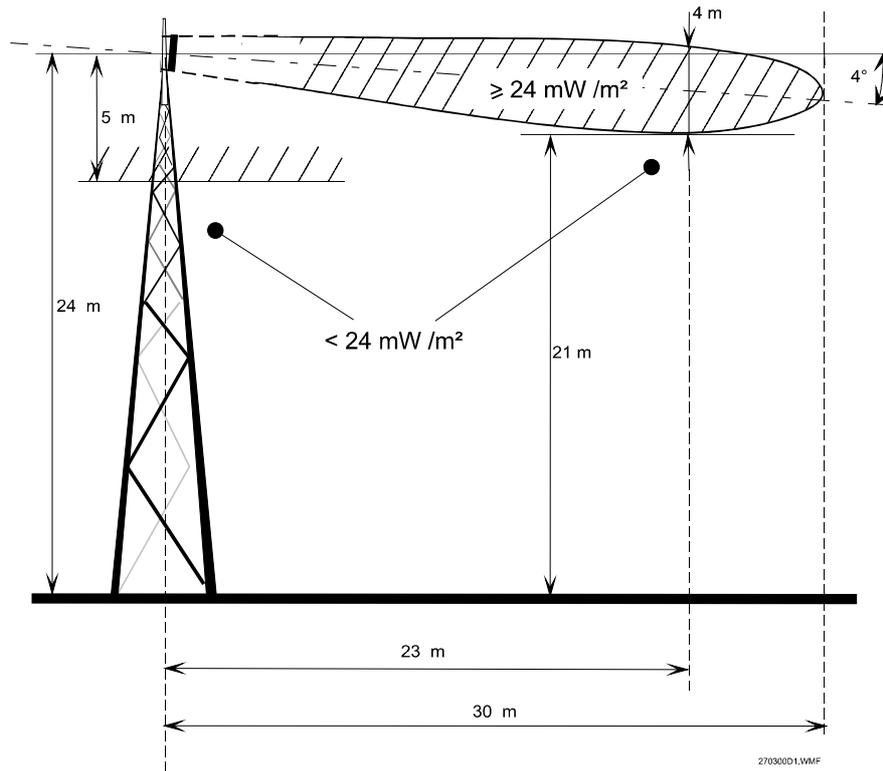


Figure 3 – Coupe verticale de la zone où la densité de puissance est $\geq 24 \text{ mW/m}^2$ (puissance totale = 8 W / gain = 35 / angle d'inclinaison du faisceau = 4°)

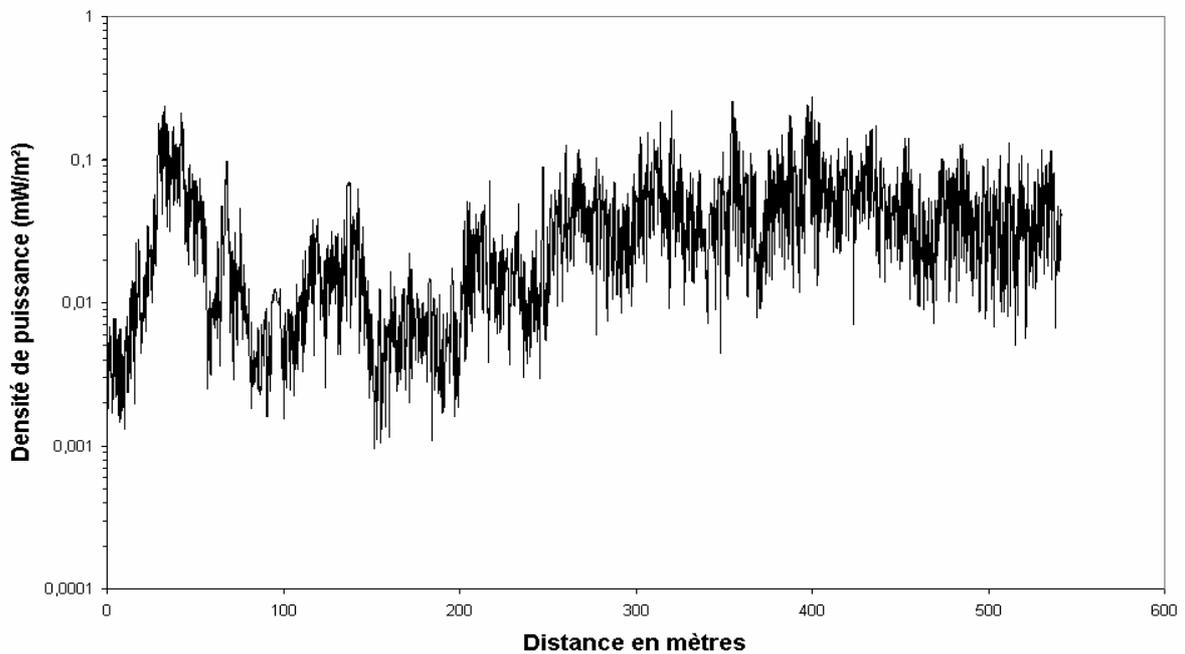


Figure 4 – Variation de la densité de puissance (en mW/m^2), à 3 m du sol, le long d'un parcours de 550 m (2^{ème} opérateur)

2. Champ derrière, en dessous et au-dessus d'une antenne

La densité de puissance mesurée à une distance de 2 m derrière une antenne est presque toujours inférieure, voire très inférieure, à 24 mW/m^2 . En dessous et au-dessus de l'antenne, la

densité est inférieure à 24 mW/m^2 à une distance de 4 ou 5 m (voir figure 3) même s'il n'y a aucun obstacle entre l'antenne et le point de mesure, ceci est dû au fait que le rayonnement en dehors du faisceau est faible.

Lorsque qu'une antenne est installée sur le toit d'un bâtiment, les champs mesurés à l'étage inférieur sont très faibles. A titre d'exemple, des mesures réalisées au balcon d'un appartement du dernier étage d'un immeuble, au-dessus duquel deux antennes étaient installées, ont montré que la densité de puissance maximale était de l'ordre de 1 mW/m^2 ; ce maximum n'était rencontré qu'en quelques points situés juste sous l'antenne. Dans l'appartement du dernier étage, la densité de puissance était toujours inférieure à $0,1 \text{ mW/m}^2$; ceci est une conséquence de la directivité des antennes et de la protection que constitue le toit.

Dans le cas où des antennes sont installées le long des façades d'un bâtiment, les murs atténuent fortement le champ et apportent une protection efficace. Il faut toutefois veiller à ce que le faisceau ne soit pas dirigé vers des fenêtres ou des terrasses trop proches des antennes.

CONCLUSIONS

Les mesures réalisées à proximité d'implantations de différents types ont montré que des champs dépassant le seuil de 24 mW/m^2 n'existent que dans le faisceau de l'antenne, ou juste en dessous, à moins de 4 ou 5 m s'il n'y a aucun obstacle. Il y a donc lieu de veiller à ce que le faisceau de l'antenne ne soit pas dirigé vers une zone où pourrait se trouver des personnes pendant une période prolongée; ce faisceau peut être délimité par la courbe d'égale intensité correspondant à la limite de champ imposée; cette courbe, semblable à celle de la figure 3, peut être calculée à partir de formules théoriques et du diagramme de rayonnement de l'antenne.

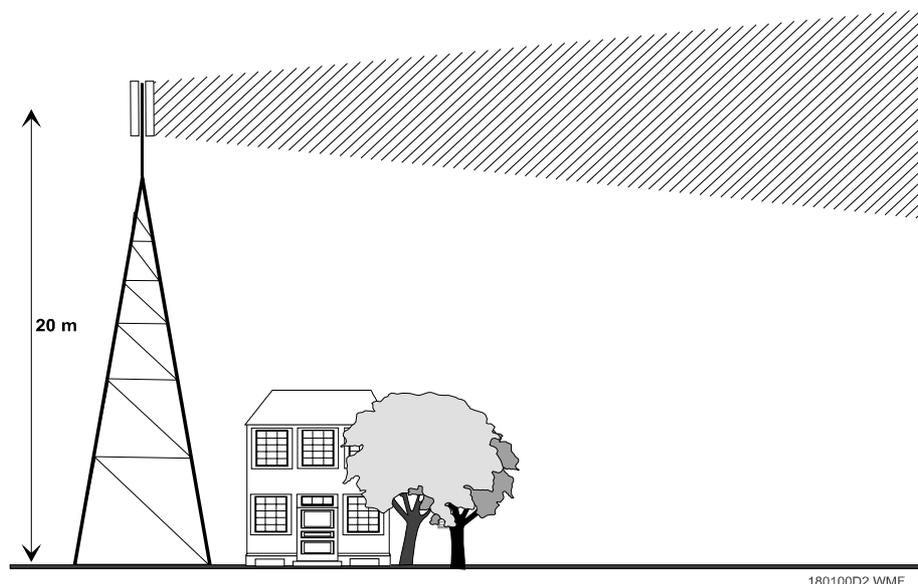


Figure 5 – Antennes situées nettement au dessus des habitations

Dans les cas courants, et s'il n'y a qu'un seul opérateur, la distance, dans le faisceau, à partir de laquelle la densité de puissance est inférieure à 24 mW/m^2 varie entre 30 et 80 m, selon le type d'antenne et la puissance rayonnée. La hauteur de l'antenne par rapport au sol et aux bâtiments voisins est un paramètre prépondérant comme le prouve les deux exemples

suivants. La figure 5 illustre un cas qui suscite souvent des inquiétudes, à tort, car le rayonnement passe nettement au-dessus du sommet des habitations. Les mesures, à 3 m du sol et à l'extérieur, indiquent que la densité de puissance ne dépassait jamais 1 mW/m^2 . Il faut aussi ajouter que les murs et les toitures atténuent considérablement le rayonnement à l'intérieur des bâtiments et fournissent une protection supplémentaire. Aux fréquences utilisées en téléphonie mobile, des mesures montrent qu'un mur extérieur réduit la densité de puissance d'un facteur variant entre 5 et 10, selon son épaisseur et sa composition.

L'exemple de la figure 6 requiert plus d'attention puisqu'un bâtiment se trouve dans le faisceau. Dans ce cas, il faut tenir compte de toutes les caractéristiques de l'antenne (puissance, gain, angle d'inclinaison du faisceau, nombre d'opérateurs, etc.) afin de contrôler si les limites prescrites sont respectées. Si ce n'est pas le cas, une solution consiste à utiliser un pylône plus élevé.



Figure 6 – Bâtiment situé dans le faisceau

Le cas des antennes installées sur le toit, ou le long des façades de bâtiments ne devrait, normalement, présenter aucun risque pour ses occupants, du fait que les antennes concentrent leur rayonnement dans la direction horizontale et aussi grâce à la protection apportée par le toit et les murs. Par contre, il convient de veiller à ce qu'il n'y ait pas, face aux antennes, de bâtiments trop proches. Il en découle que les craintes soulevées par l'implantation d'antennes sur les toits d'hôpitaux ou d'écoles sont généralement non fondées, car les mesures prouvent, sans aucune contestation possible, qu'il est de loin préférable d'installer les antennes sur le toit du bâtiment que l'on veut protéger, plutôt que sur un autre toit qui serait situé à 200 ou 300 m.

L'étude a permis de dégager un certain nombre de règles simples permettant de réduire l'exposition à laquelle sont soumis les riverains; elle a également mis en évidence l'importance de la hauteur de l'antenne par rapport au sol et aux bâtiments voisins et de l'angle d'inclinaison du faisceau.

Samenvatting

Steeds meer mobiele telefonen komen in het gebruik en het aantal dienst verstrekkers neemt toe met als gevolg dat ook de zendmasten talrijker worden. De onrust die gepaard gaat met de mogelijke schadelijke gevolgen gebonden aan het vertoeven in de nabijheid van de antennes heeft de "Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE) du Ministère de la Région wallonne" er toe geleid het ISSeP opdracht gegeven de electro-magnetische velden te meten. Dit met het oog op een vergelijking van de meetgegevens met de bestaande normen of richtlijnen. De studie begon in maart 1999. De belangrijkste gegevens zijn hier samen gevat. De uitvoerige gegevens zijn beschikbaar in een verslag van mei 2000.

Summary

More and more mobile phones are in use. The number of operators increases too, and so do the antennas. To deal with the unrest about possible health effects caused by the electro-magnetic fields near the emitters, the "Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE) du Ministère de la Région wallonne" decided to order an investigation to the ISSeP. The objective was to compare these electro-magnetic fields, with existing norms and recommendations. The enquiry started in March 1999. The main results are summarised here. The full details are reported in a document of May 2000.