

- EFFET DE PEAU -

PENETRATION D'UN CHAMP

ELECTROMAGNETIQUE ALTERNATIF

DANS UN ORGANISME VIVANT

1 -	L'EFFET DE PEAU.....	1
1.1 -	Présentation.....	1
1.2 -	Conductivité du corps humain.....	2
1.3 -	Evolution de la conductivité en fréquence	2
1.4 -	Formule théorique de l'effet de « peau ».....	2
1.5 -	Effet de « peau » et organisme humain	2
1.6 -	Profondeur de pénétration des champs EM par organe dans l'organisme vivant.....	3
	<i>1.6.1 - Le liquide cérébro-spinal et le coeur.....</i>	<i>3</i>
	<i>1.6.2 - Epaisseur de peau en fonction de la fréquence du champ magnétique alternatif.....</i>	<i>3</i>
	<i>1.6.3 - Epaisseur de peau entre 1 kHz et 1 MHz - fréquences polluantes du réseau 230V.....</i>	<i>4</i>
	<i>1.6.4 - Epaisseur de peau selon les organes – Restriction de base du décret 2002-775.....</i>	<i>4</i>
2 -	CONCLUSION - RESTRICTION.....	6

1 - L'EFFET DE PEAU

1.1 - Présentation

L'effet de peau est un phénomène d'origine électromagnétique qui existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs.

Il modifie la circulation de charges électriques dans un milieu conducteur en repoussant les électrons vers la périphérie de celui-ci d'autant plus que la fréquence du courant, ou du champ électromagnétique qui l'induit, augmente. Il dépend de la conductivité du milieu conducteur.

Le terme « peau » est ici l'appellation donnée à la couche superficielle de tout milieu conducteur dans lequel circule un courant alternatif. Ce milieu conducteur peut être organique, métallique, liquide, de toute nature.

1.2 - Conductivité du corps humain

Le corps humain est un milieu conducteur d'électricité de mauvaise qualité et presque toujours anisotrope. Toutefois, la conductivité et la permittivité relative de chaque tissu biologique du corps humain a été précisée sur un large spectre de fréquence. Ce sont les travaux de **C. Gabriel**, S. Gabriel et E. Corthout dans « The dielectric properties of biological tissues : I.Literature survey ». Phys. Med. Biol, 41(11) : 2231–2249, 1996.

1.3 - Evolution de la conductivité en fréquence

L'évolution de la conductivité et la permittivité relative des organes en fréquence se divise en quatre grandes zones. L'une d'elle correspond à celle des champs magnétiques rayonnés par des dispositifs CPL auxquels nous nous intéressons, entre 1 kHz et 1MHz.

A chaque fréquence, la conductivité complexe σ_C s'exprime avec la conductivité et la permittivité mesurées

$$\sigma_C = \sqrt{\sigma^2 + (2 * \pi * f * \epsilon_0 * \epsilon)^2} \text{ (S)siemens}$$

1.4 - Formule théorique de l'effet de « peau »

La formule de l'épaisseur de « peau » qui exprime en mètres la profondeur où vont se concentrer les électrons d'un courant traversant un milieu conducteur est donnée dans un cours du professeur de l'ENSHEEIT du Pr.COULON. Ce courant peut être aussi être induit par un champ magnétique alternatif :

$$\Delta(m) = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * \mu_0 * \mu_r * f}}$$

La conductivité complexe σ_C est l'inverse de la résistivité ρ , ainsi :

$$\Delta(m) = \sqrt{\frac{1}{\sigma_C * \pi * \mu_0 * \mu_r * f}} \text{ ou } \Delta(m) = \sqrt{\frac{1}{\pi * \mu_0 * \mu_r * f} * \frac{1}{\sqrt{\sigma^2 + (2 * \pi * f * \epsilon_0 * \epsilon_r)^2}}}$$

Avec :

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} = 1,25664E - 06$$
$$\epsilon_0 = \frac{1}{36 * 10^9 * \pi} = 8,84194E - 12$$

1.5 - Effet de « peau » et organisme humain

La perméabilité magnétique relative μ_r de tous les organes humains vaut **1**, et leurs conductivités est plus d'un million de fois plus faible que celle des métaux.

Ainsi, avec une résistivité (valeur inverse de la conductivité) de 17,5 nano $\Omega.m$, aucun courant ne circule en profondeur dans un volume de cuivre dès que la fréquence du courant alternatif augmente.

A **90 KHz**, fréquence maximale du CPL **Linky**, la formule dessus calcule l'épaisseur de la couche superficielle dans un fil de cuivre, peu importe son diamètre, dans laquelle un courant CPL restera concentré.

Cette couche est très faible. Elle est **de 0,12 millimètres**.

En revanche, comme la conductivité complexe des organes vitaux humains est de l'ordre de **1 S**, (et donc résistivité $\rho = 1/\sigma = 1 \Omega.m$), et qu'elle varie d'un facteur 100 environ selon les organes et la fréquence, l'effet de « peau » est beaucoup plus faible, ce qui signifie que le courant alternatif circule dans l'intégralité de l'organe, pas seulement dans les couches superficielles, ceci jusqu'à des fréquences élevées.

1.6 - Profondeur de pénétration des champs EM par organe dans l'organisme vivant

1.6.1 - Le liquide cérébro-spinal et le coeur

A 90 kHz, les paramètres électriques du liquide cérébro-spinal et du coeur donnés par les travaux cités sont de :

$\sigma_r = 2$ $\varepsilon_r = 110$ $\text{donc } \sigma_C = 2 (S)$	$\sigma_r = 0.11$ $\varepsilon_r = 3,5 * 10^5$ $\text{donc } \sigma_C = 1,75 (S)$
--	---

$$\Delta_{(90KHz)} = \sqrt{\frac{1}{\sigma_C * \pi * \mu_0 * 90000}}$$

A 90 kHz, fréquence maximale des champs magnétiques rayonnés par le **système Linky**, l'épaisseur de « peau » dans le liquide cérébro-spinal à est de **118 centimètres**, et pour le coeur, **126 centimètres** !

Autant dire que tous les organes du corps reçoivent sans atténuation aucune le champ magnétique présent à ces fréquences, qui induira à son tour dans ceux-ci un courant d'électrocution à son image.

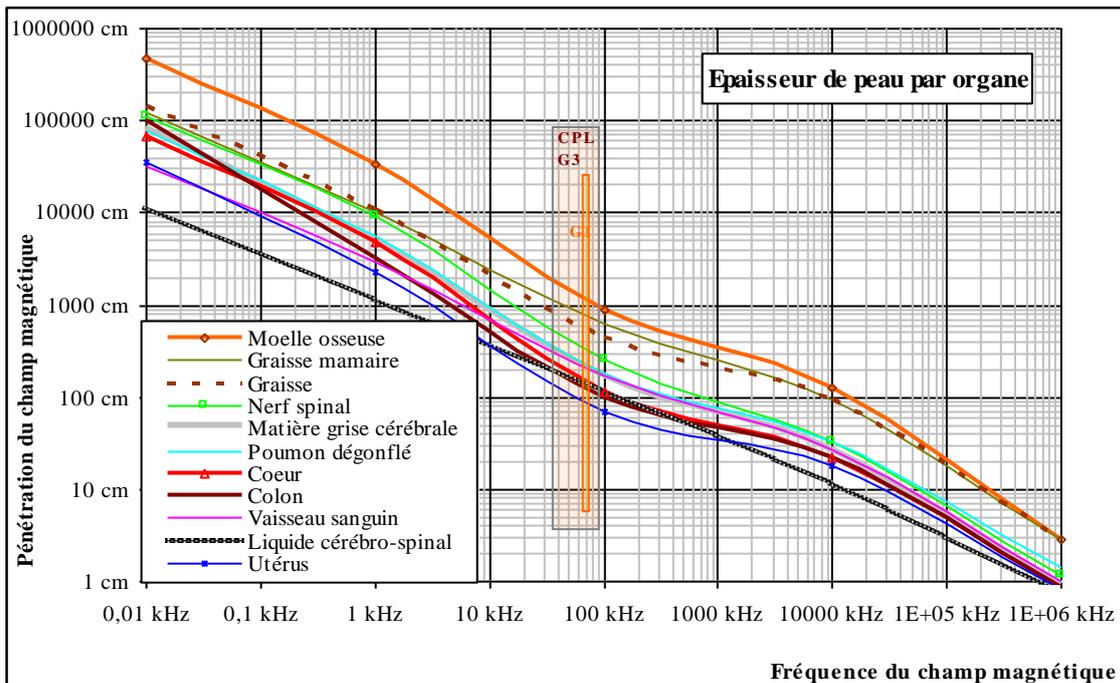
1.6.2 - Epaisseur de peau en fonction de la fréquence du champ magnétique alternatif

En fait, la table de Gabriel et al., affichée plus bas, des conductivité et permittivité relative de nombreux organes mesurées entre 10 hertz et gigahertz, nous permet de calculer l'épaisseur de peau sur une grande plage de fréquences pour ces organes humains.

A chaque fréquence, cette épaisseur nous donne, rappelons-le, une bonne idée de la pénétration d'un champ magnétique alternatif irradiant un organe, et donc la profondeur à laquelle apparaîtront des courants induits à l'image du champ magnétique rayonné.

Sur le graphique dessous, l'épaisseur de peau pour une dizaine d'organes vitaux de l'organisme est calculée sur toute la bande de fréquence disponible dans les tables de Gabriel et al, est affichée.

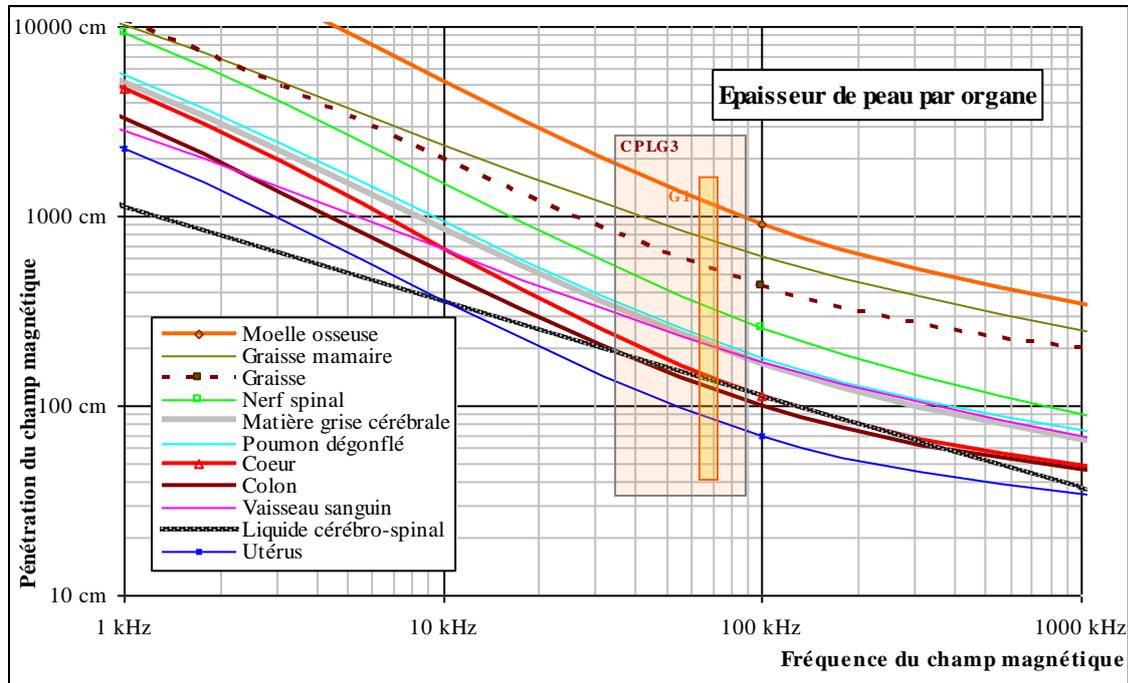
Les bandes des fréquences CPL G1 et G3 du Linky sont localisées sur le spectre par 2 bandes verticales colorées.



Epaisseur de peau par organe pour un champ magnétique entre 10 Hertz et 1 Gigahertz

1.6.3 - Épaisseur de peau entre 1 kHz et 1 MHz - fréquences polluantes du réseau 230V

Un affichage des épaisseurs de peau recentré sur la bande des hautes fréquences polluantes que l'on trouve sur le réseau de distribution 230V, nous permet de mieux apprécier qu'à celles-ci, la pénétration du champ magnétique est pratiquement totale, puisque supérieure à 1 mètre aux fréquences du CPL Linky, et encore de 35 à 350 centimètres à 1 Mégahertz.



Épaisseur de peau par organe pour un champ magnétique entre 1 Kiloherz et 1 Mégahertz

1.6.4 - Épaisseur de peau selon les organes – Restriction de base du décret 2002-775

Les organes dont l'épaisseur de peau est illustrée dans les courbes ici ont été choisis de façon à afficher les valeurs extrêmes que celui-ci peut atteindre.

Ainsi, à part l'os compact, les ongles et les dents qui sont encore dessous, ce sont la moelle osseuse et les graisses qui atténuent le moins en profondeur un champ magnétique haute fréquence les traversant.

A l'inverse, l'utérus, le colon, ou le cœur sont des organes qui atténuent plus rapidement la propagation du champ magnétique dans leur profondeur. Ces organes ont une épaisseur de peau plus faible car ils sont meilleurs conducteurs électriques.

Ainsi, plus l'épaisseur de peau d'un organe est faible, plus il est le siège de courants induits puissants, au prorata de la surface qu'il offre perpendiculairement au vecteur du champ magnétique.

In fine, le courant induit est un déplacement de charges ioniques qui perturbe le fonctionnement des tissus vivants. C'est justement la densité de courant induit, nommée "**restriction de base**" dans le décret 2002-775, qui **doit** être respectée pour ne pas mettre en danger un public s'il est exposé à un champ électromagnétique haute fréquence.

La relation entre champ magnétique et courant induit dans un milieu conducteur a été étudiée par notre laboratoire dans le document "**Effets d un champ magnétique sur un organe**".

Table des paramètres électriques des organes humains mesurés par C. Gabriel, S. Gabriel et E. Corthout dans *The dielectric properties of biological tissues : III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues* ». Phys. Med. Biol, 41(11) :2271–2293, 1996.

Document extrait de la thèse de Laurent BERNARD de 2007: « *Caractérisation électrique des tissus biologiques et calcul des phénomènes induits dans le corps humain par des champs électromagnétiques de fréquence inférieure au GHz* ».

B. PERMITTIVITÉ ET CONDUCTIVITÉ DES TISSUS BIOLOGIQUES

Tissu	10Hz		1kHz		100kHz		10MHz		1GHz	
	σ	ϵ_r								
Aorte	0.25	10^7	0.31	1.5×10^5	0.31	1.5×10^5	0.34	1.1×10^2	0.73	4.5×10^1
Vessie	0.20	5.1×10^6	0.21	5.1×10^4	0.21	5.1×10^4	0.27	5.1×10^1	0.40	1.9×10^1
Sang	0.70	5.3×10^3	0.70	5.3×10^3	0.70	5.3×10^3	1.10	2.8×10^2	1.58	6.1×10^1
Vaisseau sanguin	0.25	10^7	0.31	1.5×10^5	0.31	1.5×10^5	0.34	1.1×10^2	0.73	4.5×10^1
Fluide corporel	1.50	9.9×10^1	1.50	9.9×10^1	1.50	9.9×10^1	1.50	7.0×10^1	1.67	6.9×10^1
Os spongieux	7.6×10^{-2}	10^7	8.2×10^{-2}	1.2×10^4	8.2×10^{-2}	1.2×10^4	0.12	7.1×10^1	0.36	2.1×10^1
Os compact	2.0×10^{-2}	5.5×10^4	2.0×10^{-2}	2.7×10^3	2.0×10^{-2}	2.7×10^3	4.3×10^{-2}	3.7×10^1	0.16	1.2×10^1
Moelle osseuse	9.8×10^{-4}	10^6	2.3×10^{-3}	5.6×10^3	2.3×10^{-3}	5.6×10^3	1.1×10^{-2}	1.9×10^1	4.3×10^{-2}	5.49
Matière grise cérébrale	2.8×10^{-2}	4.1×10^7	9.9×10^{-2}	1.6×10^5	9.9×10^{-2}	1.6×10^5	0.29	3.2×10^2	0.99	5.2×10^1
Matière blanche cérébrale	2.8×10^{-2}	2.8×10^7	6.3×10^{-2}	7.0×10^4	6.3×10^{-2}	7.0×10^4	0.16	1.8×10^2	0.62	3.9×10^1
Graisse mammaire	1.5×10^{-2}	1.2×10^7	2.4×10^{-2}	1.1×10^4	2.4×10^{-2}	1.1×10^4	2.8×10^{-2}	7.89	5.3×10^{-2}	5.41
Cartilage	0.16	2.0×10^7	0.17	3.2×10^4	0.17	3.2×10^4	0.37	1.8×10^2	0.83	4.2×10^1
Cervelet	4.8×10^{-2}	4.1×10^7	0.12	1.6×10^5	0.12	1.6×10^5	0.38	4.6×10^2	1.31	4.9×10^1
Liquide cérébro-spinal	2.00	1.1×10^2	2.46	6.8×10^1						
Cervix	0.30	4.0×10^7	0.52	4.9×10^5	0.52	4.9×10^5	0.63	1.8×10^2	0.99	5.0×10^1
Colon	1.2×10^{-2}	4.0×10^7	0.23	4.5×10^5	0.23	4.5×10^5	0.49	2.7×10^2	1.13	5.7×10^1
Cornée	0.41	2.0×10^7	0.42	1.0×10^5	0.42	1.0×10^5	0.87	2.6×10^2	1.44	5.5×10^1
Duodenum	0.51	2.0×10^7	0.52	5.6×10^4	0.52	5.6×10^4	0.78	2.5×10^2	1.23	6.5×10^1
Dura	0.50	5.1×10^5	0.50	5.3×10^3	0.50	5.3×10^3	0.54	1.9×10^2	0.99	4.4×10^1
Sclera	0.50	2.6×10^6	0.50	5.5×10^4	0.50	5.5×10^4	0.80	2.1×10^2	1.21	5.5×10^1
Graisse	1.2×10^{-2}	8.0×10^6	2.2×10^{-2}	2.4×10^4	2.2×10^{-2}	2.4×10^4	2.9×10^{-2}	1.4×10^1	5.4×10^{-2}	5.45
Vésicule biliaire	0.90	6.1×10^3	0.90	6.0×10^2	0.90	6.0×10^2	0.90	9.9×10^1	1.29	5.9×10^1
Bile	1.40	1.2×10^2	1.88	7.0×10^1						
Coeur	5.4×10^{-2}	2.4×10^7	0.11	3.5×10^5	0.11	3.5×10^5	0.50	2.9×10^2	1.28	5.9×10^1
Rein	5.4×10^{-2}	2.8×10^7	0.11	2.1×10^5	0.11	2.1×10^5	0.51	3.7×10^2	1.45	5.8×10^1
Cristallin	0.31	2.0×10^7	0.33	1.1×10^5	0.33	1.1×10^5	0.52	1.8×10^2	0.82	4.6×10^1
Foie	2.8×10^{-2}	1.5×10^7	4.1×10^{-2}	8.6×10^4	4.1×10^{-2}	8.6×10^4	0.32	2.2×10^2	0.90	4.6×10^1
Poumon gonflé	0.20	5.5×10^6	0.22	2.5×10^5	0.22	2.5×10^5	0.44	1.8×10^2	0.90	5.1×10^1
Poumon dégonflé	3.9×10^{-2}	3.2×10^7	8.0×10^{-2}	1.4×10^5	8.0×10^{-2}	1.4×10^5	0.23	1.2×10^2	0.47	2.2×10^1
Lymphes	0.51	2.0×10^7	0.52	5.7×10^4	0.52	5.7×10^4	0.72	1.6×10^2	1.08	5.9×10^1
Muqueuse	4.0×10^{-4}	5.8×10^4	6.6×10^{-4}	3.2×10^4	6.6×10^{-4}	3.2×10^4	0.37	2.2×10^2	0.88	4.6×10^1
Muscle	0.20	2.6×10^7	0.32	4.3×10^5	0.32	4.3×10^5	0.62	1.7×10^2	0.98	5.5×10^1
Ongle	2.0×10^{-2}	5.5×10^4	2.0×10^{-2}	2.7×10^3	2.0×10^{-2}	2.7×10^3	4.3×10^{-2}	3.7×10^1	0.16	1.2×10^1
Nerf	1.7×10^{-2}	2.0×10^7	2.9×10^{-2}	7.0×10^4	2.9×10^{-2}	7.0×10^4	0.22	1.6×10^2	0.60	3.2×10^1
Oesophage	0.51	2.0×10^7	0.52	5.6×10^4	0.52	5.6×10^4	0.78	2.5×10^2	1.23	6.5×10^1
Ovaire	0.31	2.0×10^7	0.32	5.4×10^4	0.32	5.4×10^4	0.46	2.9×10^2	1.34	5.0×10^1
Pancréas	0.51	2.0×10^7	0.52	5.7×10^4	0.52	5.7×10^4	0.72	1.6×10^2	1.08	5.9×10^1
Prostate	0.41	2.0×10^7	0.42	5.9×10^4	0.42	5.9×10^4	0.78	2.5×10^2	1.25	6.0×10^1
Rétine	0.50	2.6×10^6	0.50	5.5×10^4	0.50	5.5×10^4	0.80	2.1×10^2	1.21	5.5×10^1
Peau déshydratée	2.0×10^{-4}	1.1×10^3	2.0×10^{-4}	1.1×10^3	2.0×10^{-4}	1.1×10^3	0.20	3.6×10^2	0.90	4.1×10^1
Peau hydratée	4.0×10^{-4}	5.8×10^1	6.6×10^{-4}	3.2×10^4	6.6×10^{-4}	3.2×10^4	0.37	2.2×10^2	0.88	4.6×10^1
Intestin grêle	0.51	2.0×10^7	0.53	2.6×10^5	0.53	2.6×10^5	1.34	4.9×10^2	2.22	5.9×10^1
Nerf spinal	1.7×10^{-2}	2.0×10^7	2.9×10^{-2}	7.0×10^4	2.9×10^{-2}	7.0×10^4	0.22	1.6×10^2	0.60	3.2×10^1
Rate	4.0×10^{-2}	4.3×10^7	0.10	1.1×10^5	0.10	1.1×10^5	0.51	4.4×10^2	1.32	5.7×10^1
Estomac	0.51	2.0×10^7	0.52	5.6×10^4	0.52	5.6×10^4	0.78	2.5×10^2	1.23	6.5×10^1
Tendon	0.25	2.0×10^7	0.38	3.0×10^5	0.38	3.0×10^5	0.41	1.0×10^2	0.76	4.6×10^1
Testicule	0.41	2.0×10^7	0.42	5.9×10^4	0.42	5.9×10^4	0.78	2.5×10^2	1.25	6.0×10^1
Thymus	0.51	2.0×10^7	0.52	5.7×10^4	0.52	5.7×10^4	0.72	1.6×10^2	1.08	5.9×10^1
Thyroïde	0.51	2.0×10^7	0.52	5.7×10^4	0.52	5.7×10^4	0.72	1.6×10^2	1.08	5.9×10^1
Langue	0.26	2.0×10^7	0.27	5.8×10^4	0.27	5.8×10^4	0.57	2.1×10^2	0.98	5.5×10^1
Dent	2.0×10^{-2}	5.5×10^4	2.0×10^{-2}	2.7×10^3	2.0×10^{-2}	2.7×10^3	4.3×10^{-2}	3.7×10^1	0.16	1.2×10^1
Trachée	0.30	5.5×10^5	0.30	4.7×10^4	0.30	4.7×10^4	0.46	1.5×10^2	0.80	4.2×10^1
Utérus	0.20	3.5×10^7	0.49	9.2×10^5	0.49	9.2×10^5	0.75	3.2×10^2	1.31	6.1×10^1
Humour vitrée	1.5	99	1.5	98.991	1.5	98.991	1.502	70.01	1.6673	68.875

2 - CONCLUSION - RESTRICTION

Le calcul de l'effet de « peau » à une fréquence fixée est une formule physique qui s'applique à un **milieu physique inerte et isotrope** dont les paramètres électriques sont définis à cette fréquence.

Or, la biologie du vivant ne rentre pas du tout dans cette catégorie. **Chaque organe est une juxtaposition incroyablement complexe de cellules très différentes les unes des autres, en interaction rapprochée et minutieusement réglée.**

Tout biologiste sait pertinemment qu'un petit déplacement de charges ioniques en son sein perturbe rapidement cette symbiose. C'est la "**densité de courant par unité de surface**", en milliampère par mètre carré, qui définit un mouvement de charges ioniques dans un milieu conducteur. Celui-ci est aussi nommé "**restriction de base**" dans le **décret 2002-775**.

A toutes fréquences, nous devons garder en mémoire que de nombreux phénomènes biologiques de pénétration tissulaire surviennent dès l'apparition de petits courants électrocuteurs :

- déplacements ioniques forcés intra et extra cellulaires,
- micro réactions chimiques,
- modification du pH cellulaire,
- renforcements ou évitements locaux de déplacement ionique par micro variations de conductivité
- perturbation de la chaîne de l'ADN au niveau atomique,
- résonances de structures organiques complexes,
- résonances de molécules chimiques,
- etc ...

Seuls, des biologistes confirmés peuvent approfondir ces phénomènes et définir le champ électromagnétique maximal admissible pour un organisme humain, organe par organe.

In fine, le calcul de l'épaisseur de peau pour un organe, à partir de ses paramètres mesurés par Gabriel et al., donne un ordre de grandeur - de la profondeur de l'organe où circulera un courant induit et de la pénétration moyenne d'un champ électromagnétique alternatif dans cet organe.