

Dosimétrie et interactions des ondes électromagnétiques avec le vivant

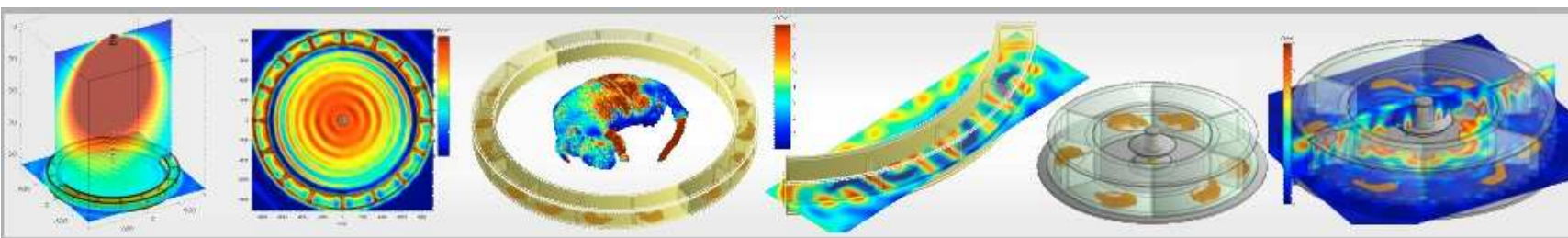
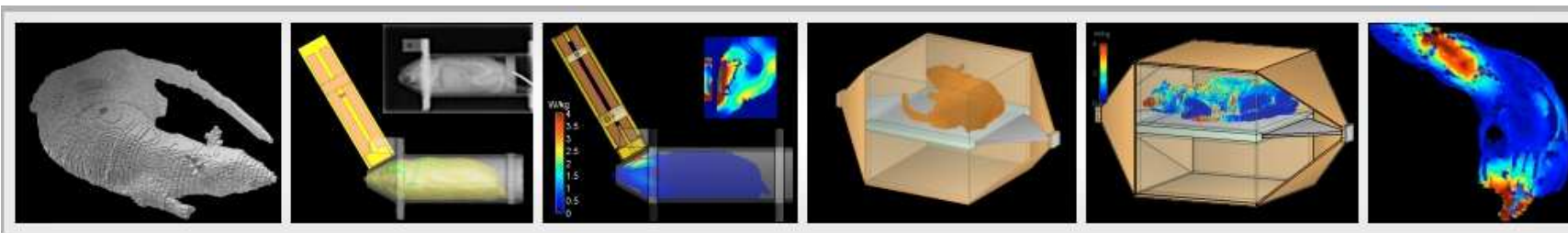
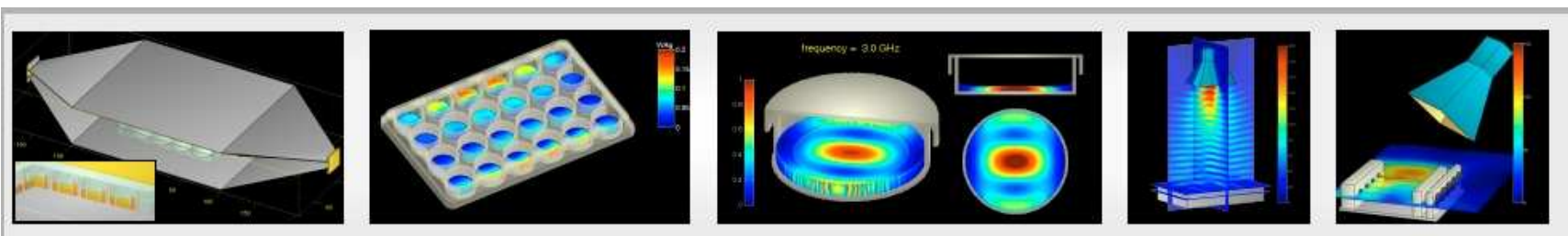
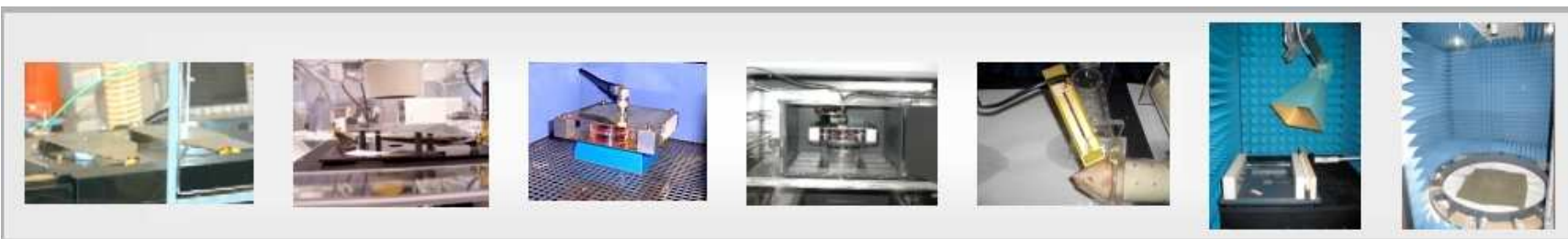
Dosimétrie Numérique Principe, méthodes et contraintes

Modélisation multi physique

Philippe LEVEQUE

leveque@unilim.fr

- ❑ Introduction sur les problèmes de dosimétrie
- ❑ Dosimétrie numérique - DAS et température
- ❑ Exposition et dosimétrie à l'échelle macroscopique
 - Dispersion
- ❑ Dosimétrie à l'échelle microscopique
 - Modèle cellulaire
- ❑ Conclusion



➤ dispersion, hétérogénéité

=> $\epsilon(\omega, x, y, z)$, eau

➤ température + hydrodynamique

=> $\epsilon(T^\circ, x, y, z)$, athermique

➤ charge d'espace

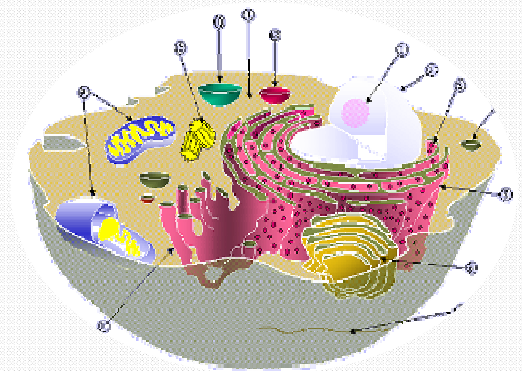
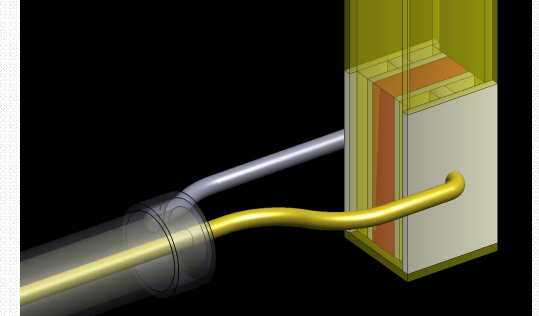
=> ions, accumulation

➤ éléments localisés, multi-échelle

=> cible, membrane

=> modélisation multiphysique appliquée à la biologie
entre Maxwell macroscopique et Dynamique Moléculaire

=> microdosimétrie



- ❑ Introduction sur les problèmes de dosimétrie
- ❑ Dosimétrie numérique - DAS et température
- ❑ Exposition et dosimétrie à l'échelle macroscopique
 - Dispersion
- ❑ Dosimétrie à l'échelle microscopique
 - Modèle cellulaire
- ❑ Conclusion

□ Tube à essai dans une cavité cylindrique

□ Solution biologique (2.45 GHz, 37°C)

$$\epsilon_r = 75 ; \sigma = 2.85 \text{ S/m} ; \rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{volume} = 5 \text{ mL} \Rightarrow 5 \text{ g}$$

□ **Estimation du DAS**, système adapté

$$\text{DAS} \Rightarrow 1 \text{ W for } 5 \text{ g} \Rightarrow 200 \text{ W/kg}$$

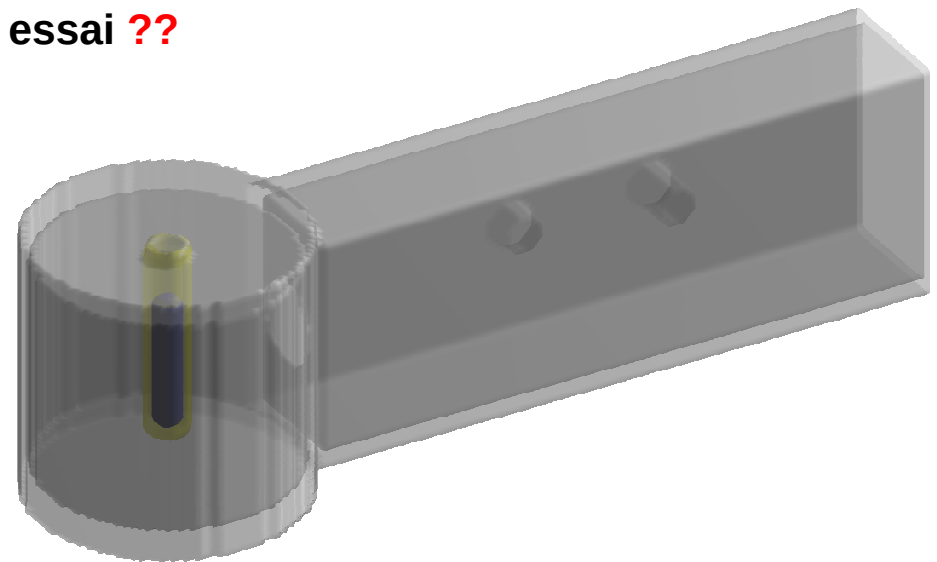
$$(\text{DAS} = \frac{\sigma E^2}{\rho} \text{ W/kg})$$

□ Distribution du champ **E** et **DAS** dans le tube à essai ??

□ **Simulation :**

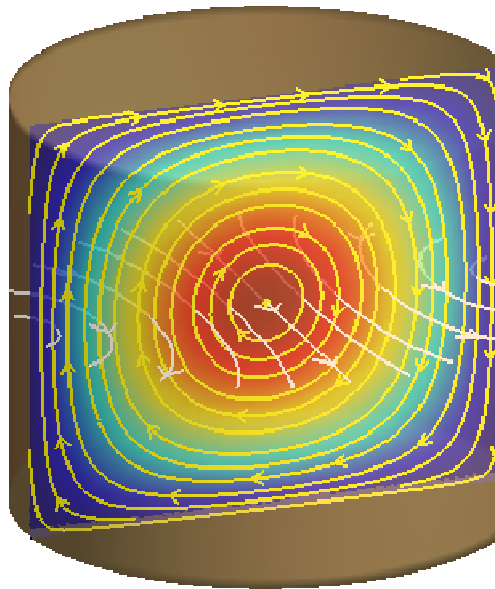
FDTD (1 x 1 x1 mm)

Excitation : guide d'onde rectangulaire

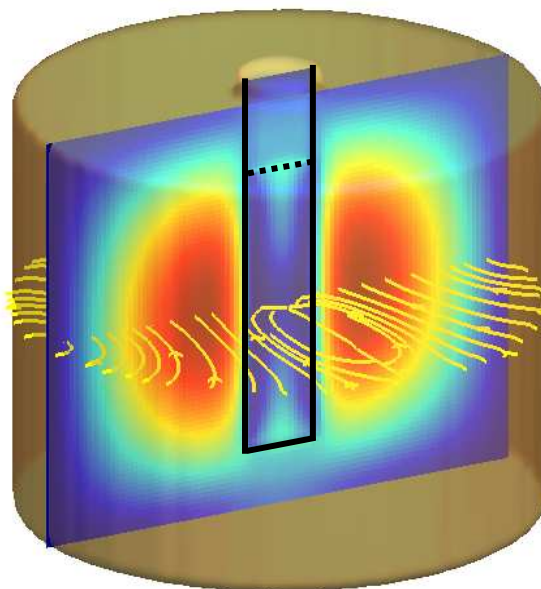


Distribution champ E

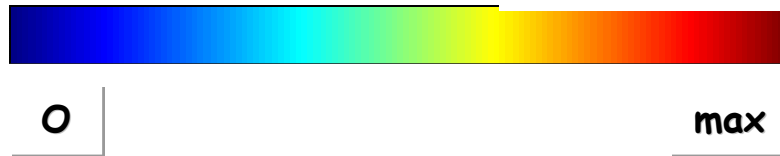
sans tube à essai



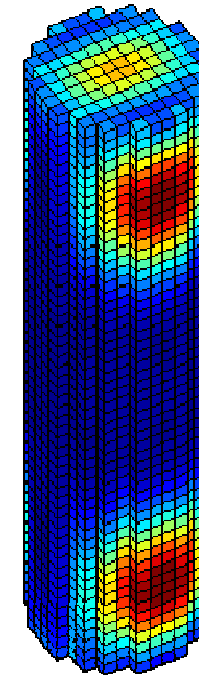
avec tube à essai



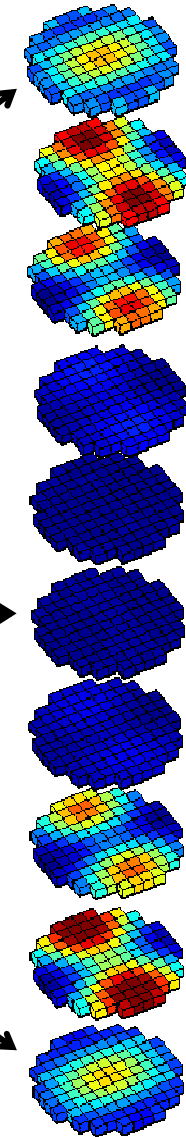
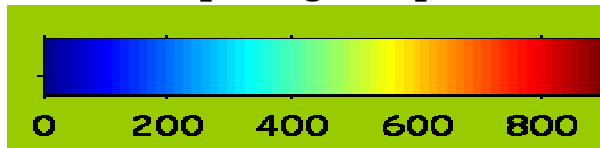
Champ E, [normalisé]



Distribution DAS



DAS, [W/kg / W]



□ **Domaine temporel, méthode FDTD**

- **Multiphysique** $\varepsilon(\omega, T^\circ, x, y, z)$

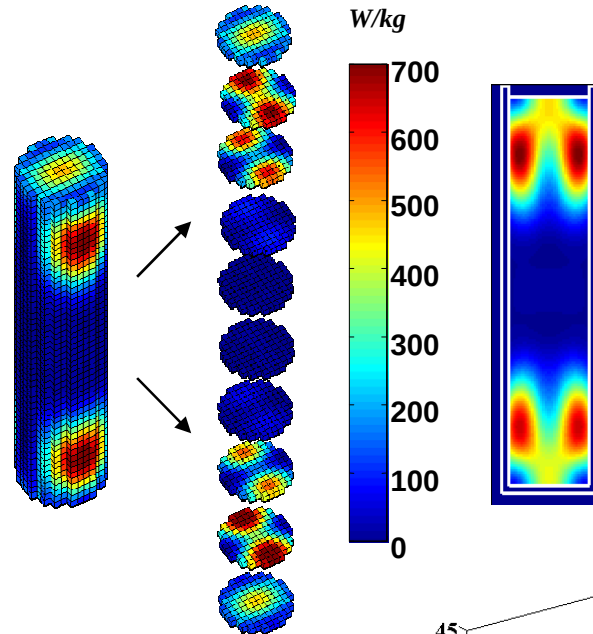
• **Thermique (Fourier)**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad})T = D_t \Delta T + \frac{P_d}{\rho_m \cdot C_m}$$

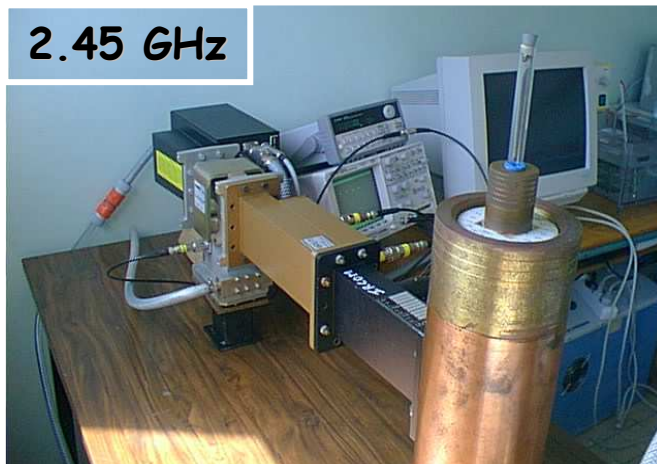
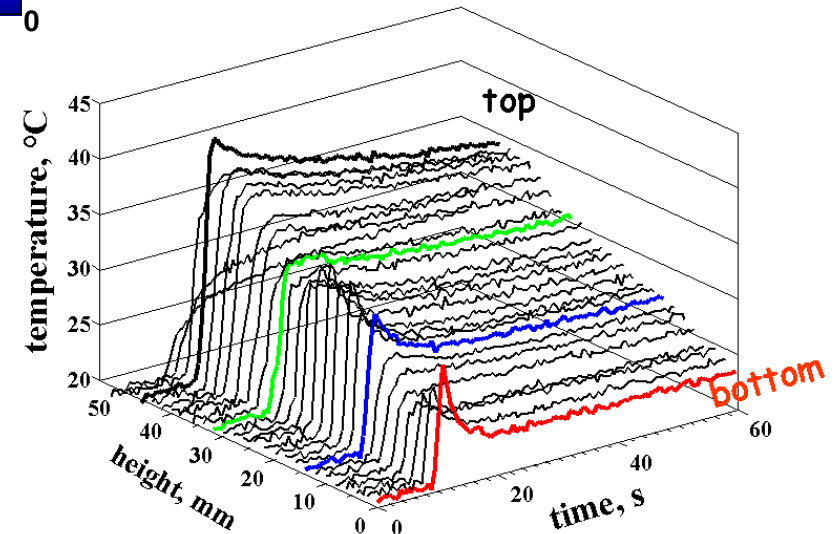
• **Hydrodynamique (Navier Stokes)**

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \cdot \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}$$

Distribution de SAR



Mesures de T°



Publication : Cueille M., et al « Development of a Numerical Model connecting Electromagnetism, Thermal and Hydrodynamics in order to analyse *in vitro* Exposure System », (2008) Annals of Telecoms, 63, pp.17-28

□ **Domaine temporel, méthode FDTD**

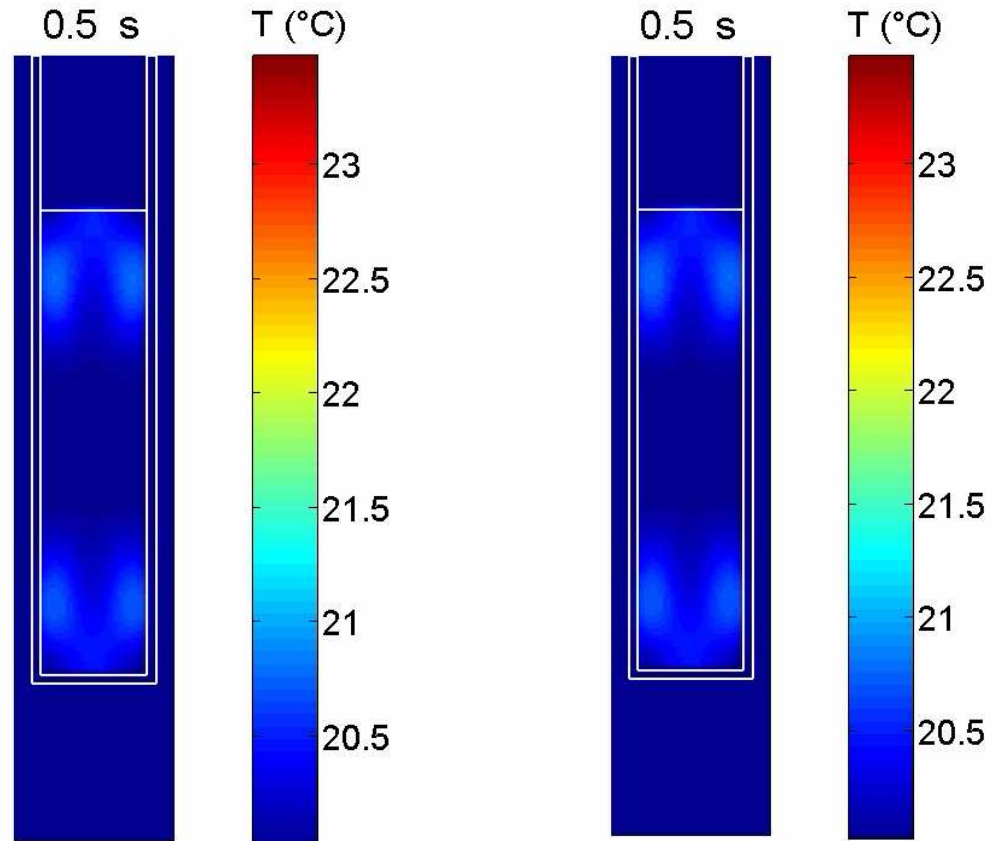
- **Multiphysique** $\varepsilon(\omega, T^\circ, x, y, z)$

• **Thermique (Fourier)**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad})T = D_t \Delta T + \frac{P_d}{\rho_m \cdot C_m}$$

• **Hydrodynamique (Navier Stokes)**

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \cdot \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}$$



Publication : Cueille M., et al « Development of a Numerical Model connecting Electromagnetism, Thermal and Hydrodynamics in order to analyse *in vitro* Exposure System », (2008) Annals of Telecoms, 63, pp.17-28

□ **Domaine temporel, méthode FDTD**

- **Multiphysique** $\varepsilon(\omega, T^\circ, x, y, z)$

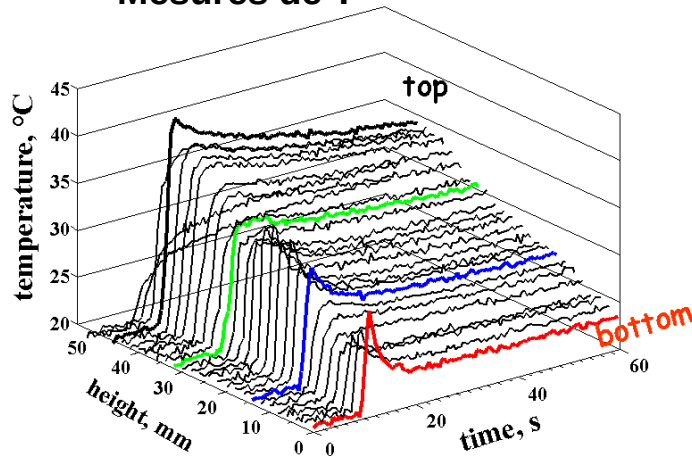
• **Thermique (Fourier)**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad})T = D_t \Delta T + \frac{P_d}{\rho_m \cdot C_m}$$

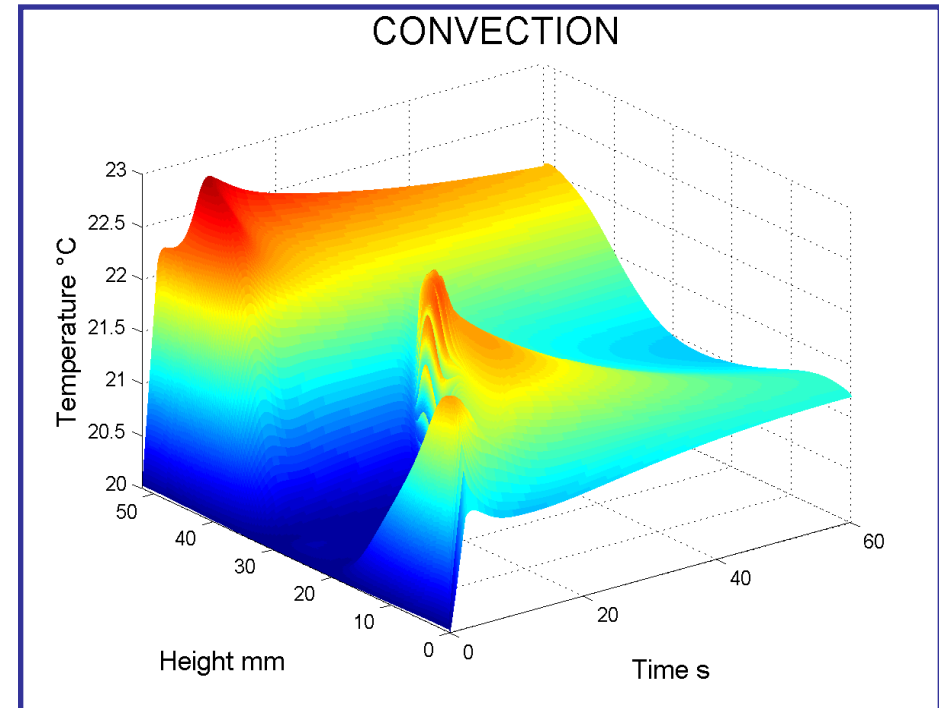
• **Hydrodynamique (Navier Stokes)**

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \cdot \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}$$

Mesures de T°



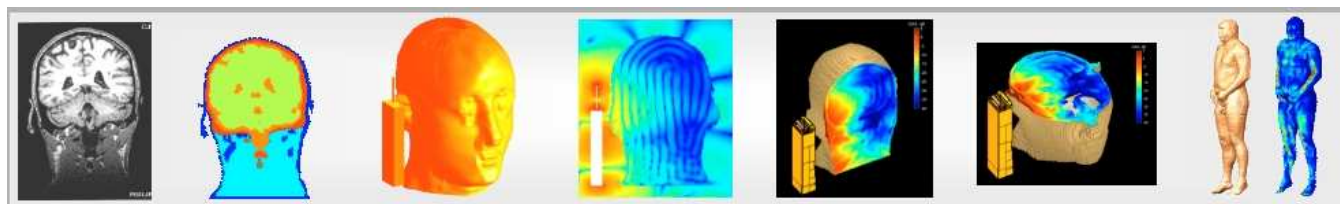
conduction T° convection



Publication : Cueille M., et al « Development of a Numerical Model connecting Electromagnetism, Thermal and Hydrodynamics in order to analyse *in vitro* Exposure System », (2008) Annals of Telecoms, 63, pp.17-28

- ❑ Introduction sur les problèmes de dosimétrie
- ❑ Dosimétrie numérique - DAS et température
- ❑ Exposition et dosimétrie à l'échelle macroscopique

- Dispersion



- ❑ Dosimétrie à l'échelle microscopique
 - Modèle cellulaire
- ❑ Conclusion

□ Domaine temporel, méthode FDTD

- Pré et post processing, code vectoriel et OpenPM
- Électromagnétisme

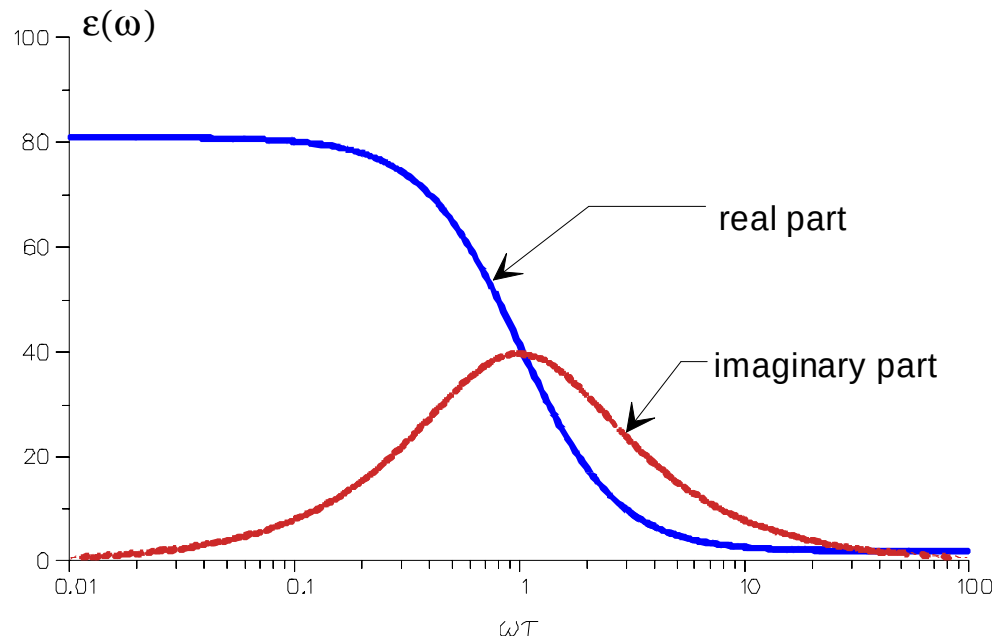
• Milieu fortement inhomogène

• Milieu dispersif

(Debye, Lorentz, Cole-Cole, Ferrite,...)

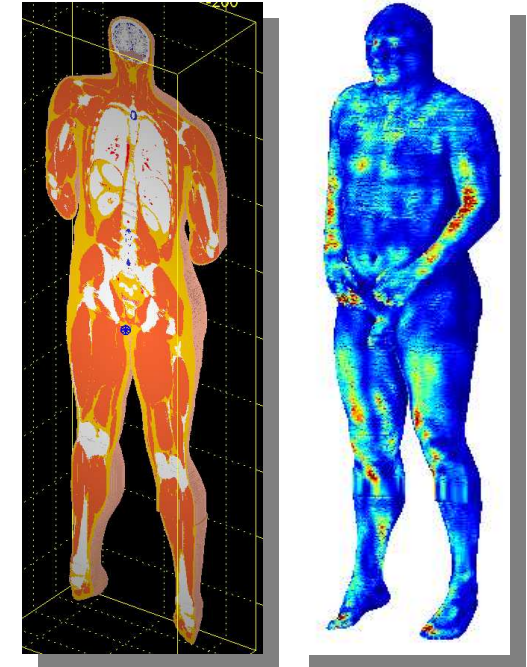
$$\vec{r} \otimes \vec{\nabla} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{r} \otimes \vec{\nabla} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$



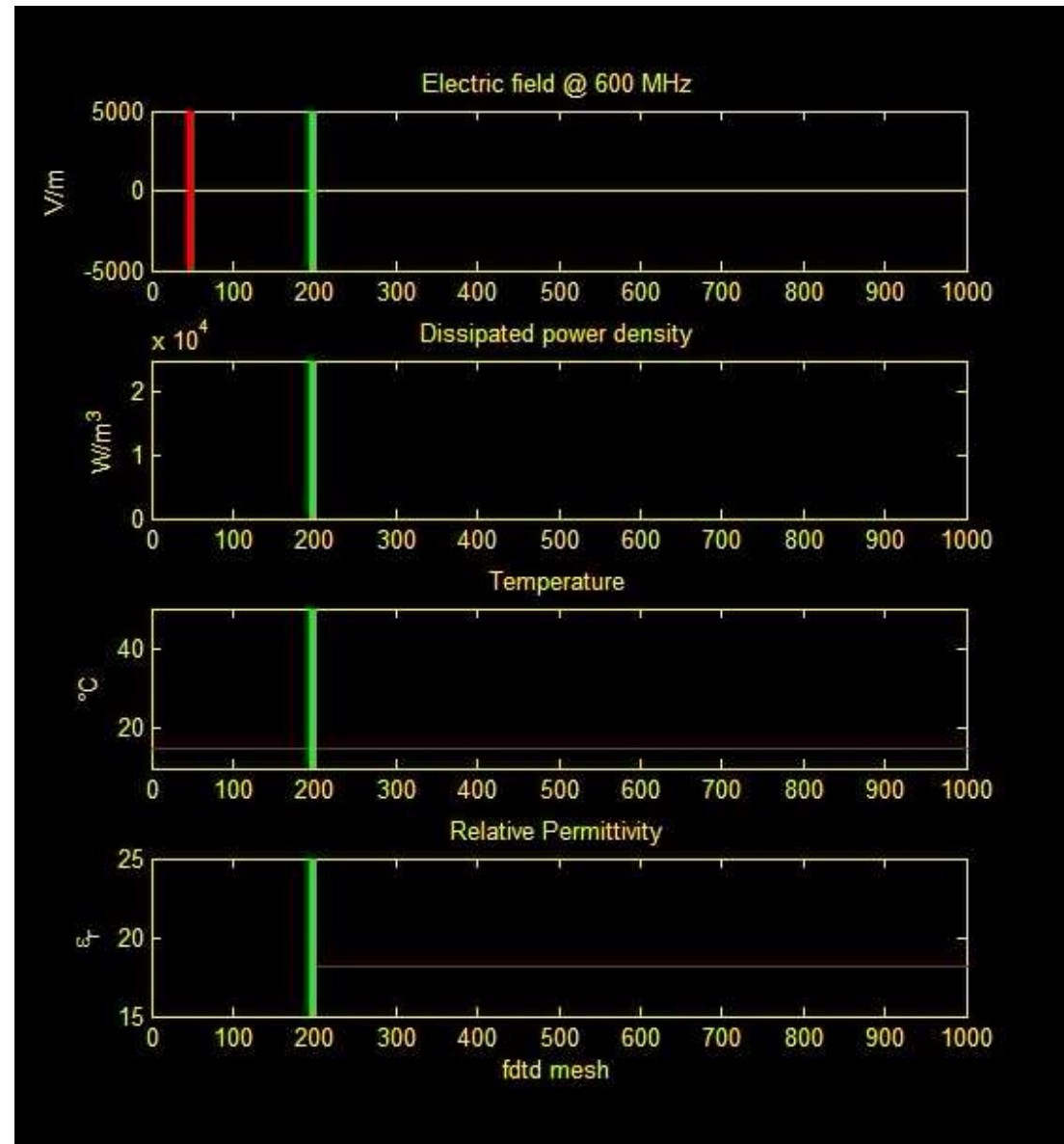
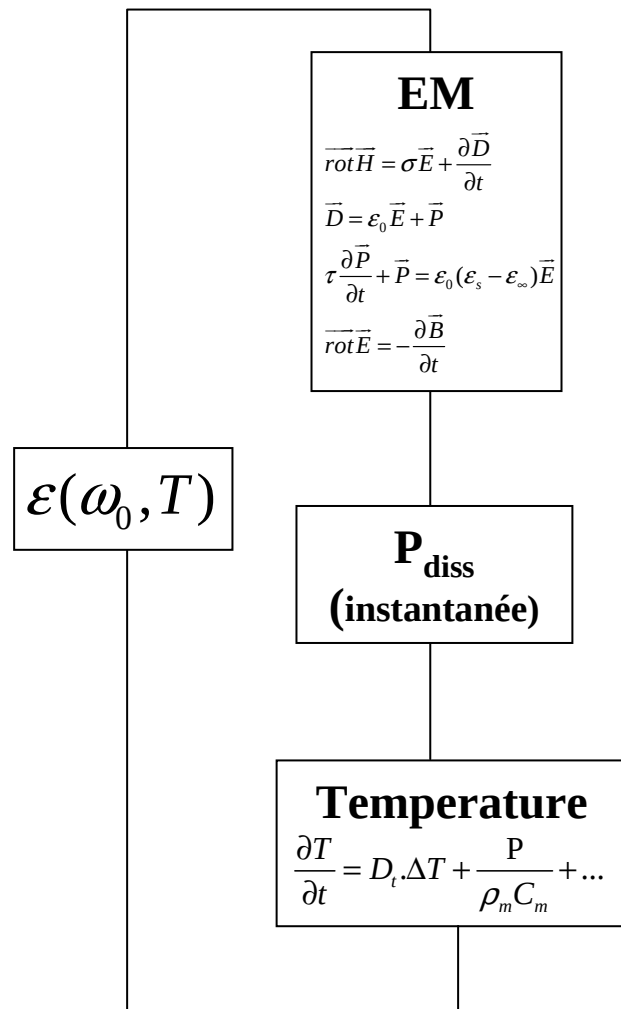
$$\underline{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}$$

$$\tau \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} + \vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \vec{E}$$



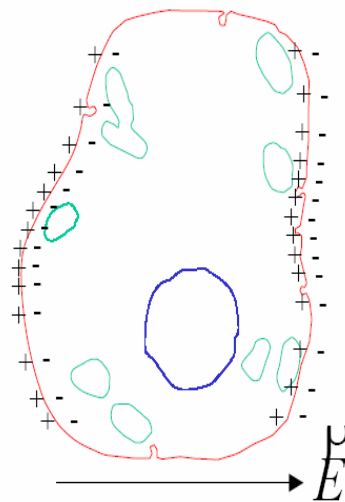
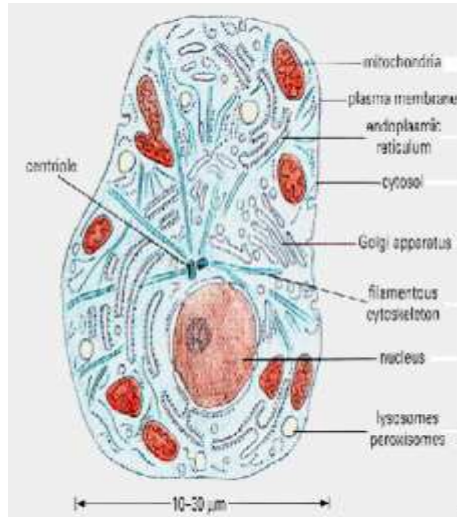
Publications : P. Leveque, A. Reineix, and B. Jecko, "Modeling of dielectric losses in microstrip patch antennas - application of ftdtd method," (1992) Electronics Letters, 28, pp. 539-541.
Melon C., et al « Frequency dependent finite-difference-time-domain [(FD)2TD] formulation applied to ferrite material » (1994) Microwave & Optical Techn. Letters., 7, pp. 577-579

□ Domaine temporel, méthode FDTD

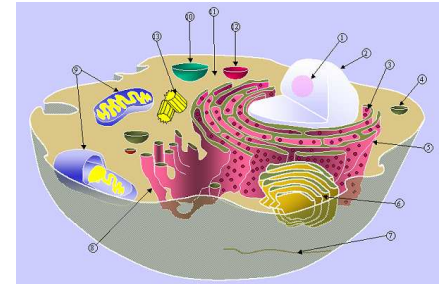


- ❑ Introduction sur les problèmes de dosimétrie
- ❑ Dosimétrie numérique - DAS et température
- ❑ Exposition et dosimétrie à l'échelle macroscopique
 - Dispersion
- ❑ Dosimétrie à l'échelle microscopique
 - Modèle cellulaire
- ❑ Conclusion

Electroperméabilisation : impulsion qq kV/cm, μ s à ms



- **cellules : charges + et -**
- **effet d'un champ électrique**
- $\vec{F} = q \vec{E}$
- **charges se déplacent**
- => force d'électrocompression**
- => membranes**
- **dépend amplitude/durée**



Objectifs : expérimenter, comprendre et modéliser les interactions des impulsions électromagnétiques avec des cellules biologiques.

=> quelles impulsions ??

=> pulses nanosecondes, mais aussi ondes mm, THz

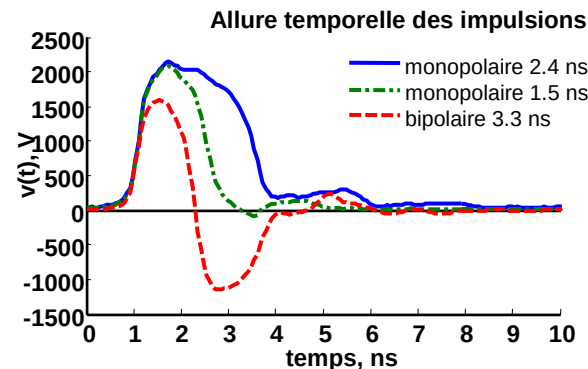
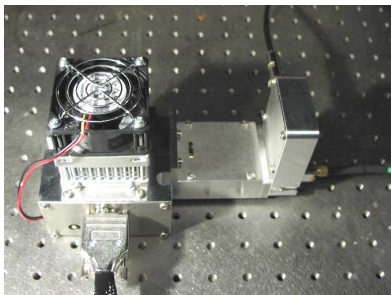
□ Champs électromagnétiques impulsionnels :

- <10ns, ~10 kV/mm
- Passage d'un phénomène de courant de conduction => membrane isole le cytoplasme
- à un courant de déplacement => le champ pénètre à l'intérieur de la cellule

=> un effet d'amplitude (non linéaire)

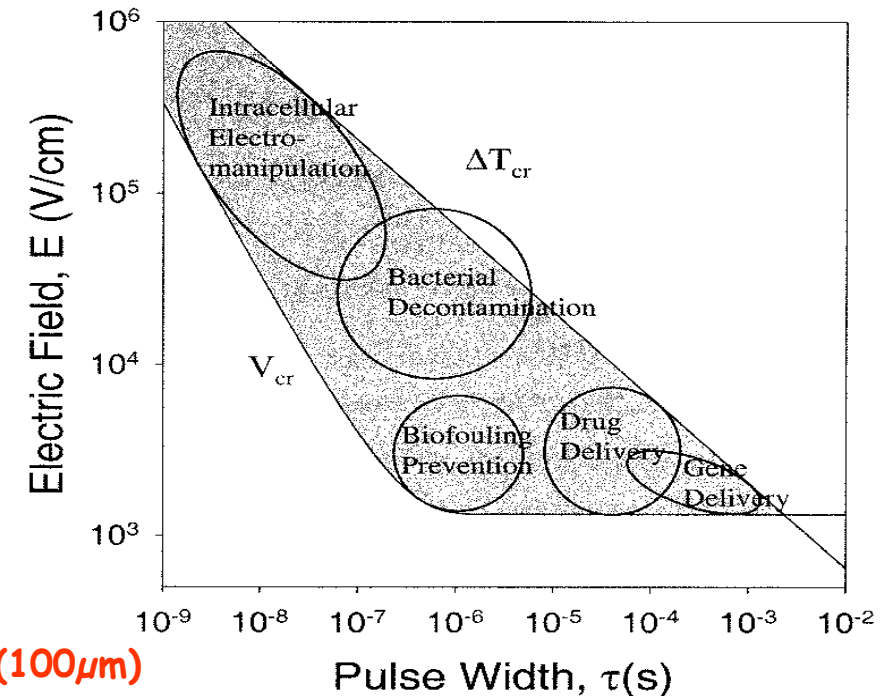
• Génération

=> Engendrer des impulsions EM nanosecondes et subnanosecondes sans gigue temporelle et à profil ajustable



- Applicateur : population (mm), quelques cellules (100μm)
- Mécanismes : thermique, charge d'espace,

Collaborations : IGR (Villejuif),
AMPERE (Lyon), IPBS (Toulouse)

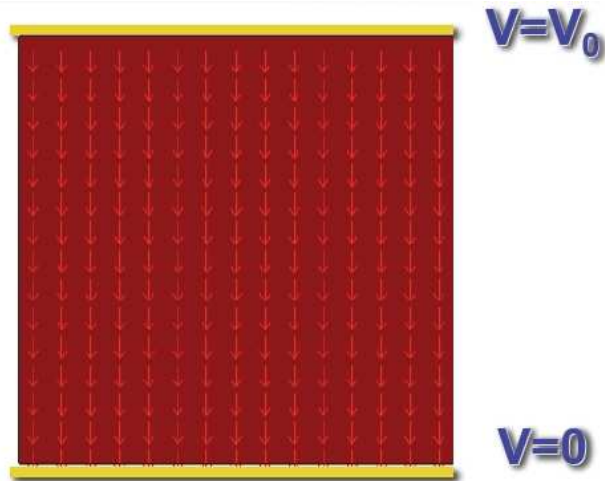


ANR (x2) : CEMIRBIO(2006), NANOPULSEBIOCHIP(2008)

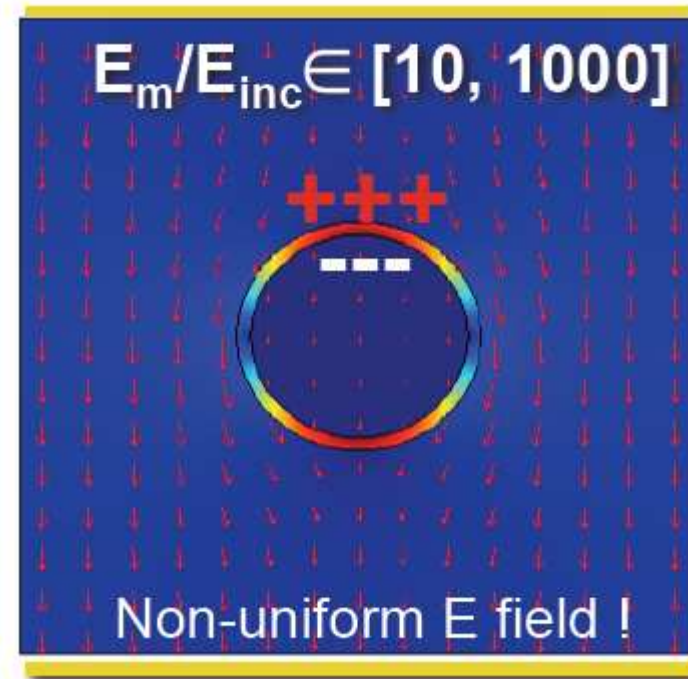
DGA/MRIS/REI "Nanopulse"

Publication : Vergne B., et al, « 30 kHz Monocycle Generator using Linear Photoconductive Switches and a Microchip Laser ». (2008) IEEE Photonics Technology Letters, 20(21-24), pp. 3132-2134

□ Dosimétrie à l'échelle de la cellule



A uniform E field (V/m) is induced!



● Formulation électro-quasi-statique :

$$-\text{div} \left(\left(\sigma + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \text{grad}(V) \right) = 0.$$

□ Dosimétrie à l'échelle de la cellule

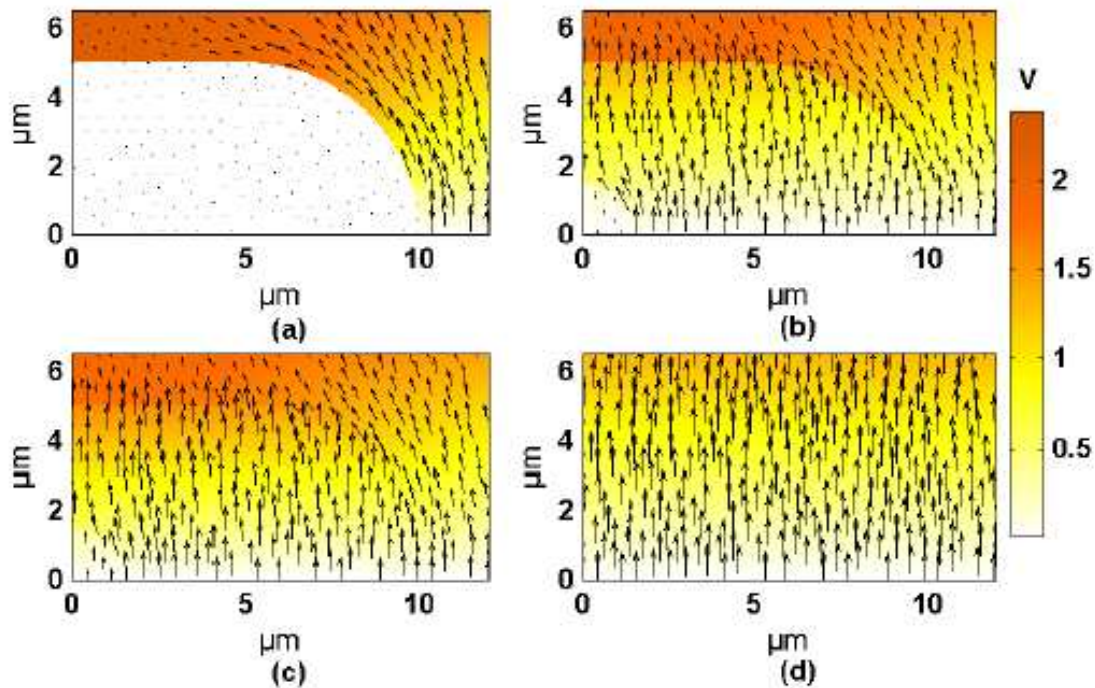


Figure: (a) 10kHz, (b) 1MHz, (c) 3MHz, (d) 1GHz.

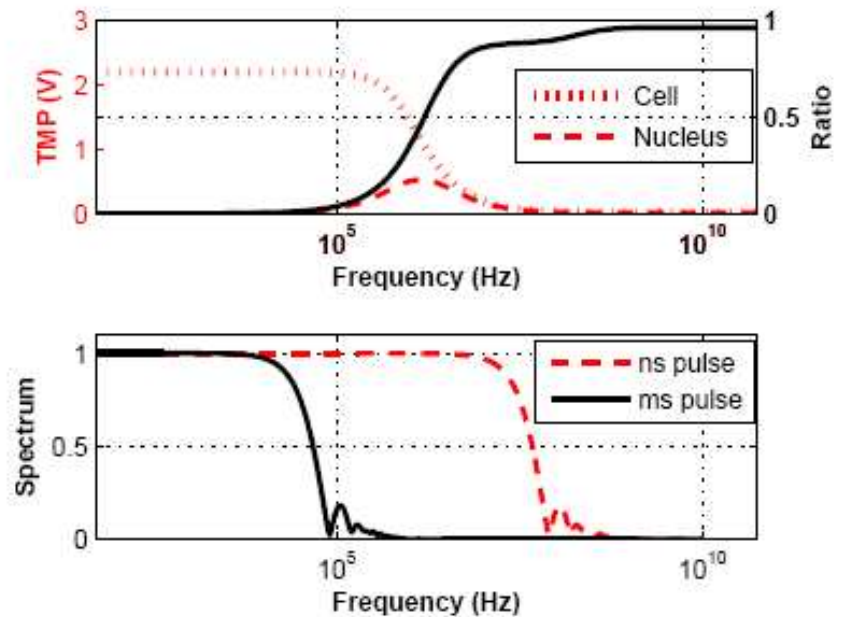
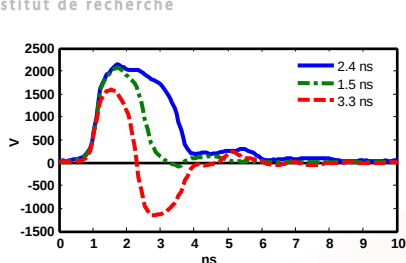
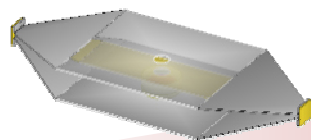


Figure: Réponse fréquentielle de la cellule et spectres normalisés des pulses ns et μ s. **E** suivant z.

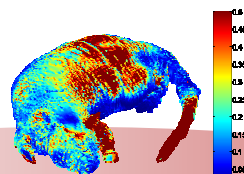
- ❑ Introduction sur les problèmes de dosimétrie
- ❑ Dosimétrie numérique - DAS et température
- ❑ Exposition et dosimétrie à l'échelle macroscopique
 - Dispersion
- ❑ Dosimétrie à l'échelle microscopique
 - Modèle cellulaire
- ❑ Conclusion



**Génération
optoélectronique**



**Système
d'exposition**



Dosimétrie

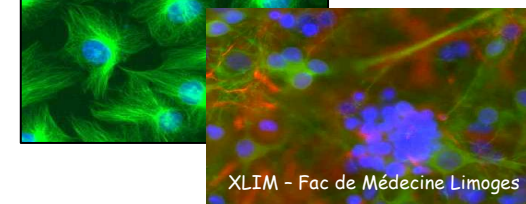
Nanopulses

**Signaux télécom
sans fil**

**Expérimentation BioEM
in vivo et *in vitro***

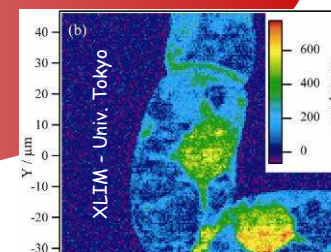
**Interaction des ondes
électromagnétiques
avec le vivant**

XLIM - Babraham Institute

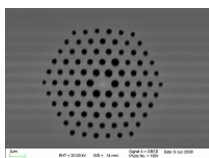


XLIM - Fac de Médecine Limoges

**Imagerie
non-linéaire CARS**



Nouveaux
Matériaux
SiC-Tellure



Guide d'onde
non-linéaire

Microlaser
de puissance

Sources polychromes
Conversion de fréquence



**Merci de votre attention
questions ?**

Philippe LEVEQUE

leveque@unilim.fr