

Peut-on évaluer l'impact des rayonnements des téléphones mobiles sur notre santé ?

Stéphane Lanteri

INRIA Sophia Antipolis - Méditerranée
06902 Sophia Antipolis Cedex, France
Stephane.Lanteri@inria.fr



INSTITUT NATIONAL
DE RECHERCHE
EN INFORMATIQUE
ET EN AUTOMATIQUE
centre de recherche

 **INRIA**
SOPHIA ANTIPOLIS - MÉDITERRANÉE



24 Septembre 2010

Conférence-débat Média Sciences, Médiathèque d'Antibes

- 1 Contextes
- 2 Interactions ondes - matière vivante
- 3 Mesure de l'exposition
- 4 Propagation d'ondes électromagnétiques
- 5 Modélisation numérique

- 1 Contextes
- 2 Interactions ondes - matière vivante
- 3 Mesure de l'exposition
- 4 Propagation d'ondes électromagnétiques
- 5 Modélisation numérique

Suivi des indicateurs de la téléphonie mobile en France

- Source: ARCEP
(Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes)
<http://www.arcep.fr>

Année	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Nombre (en millions)	0,28	1,3	2,5	5,8	11,2	20,6	29,7	37,0	38,6	41,6	43,8	48,1	51,7	55,4	58,1	61,4
Taux de pénétration actif		3 %	5 %	10 %	19 %	34 %	49 %	61,5 %	64,0 %	69,1 %	72,6 %	78,4 %	80,8 %	85,6 %	89,1 %	95,8 %

- Sondage TNS-Sofres en 2008 pour l'Association française des opérateurs mobiles
 - 71% des 12-14 ans possédaient leur propre portable
 - 95% de couverture chez les 15-17 ans

Le rôle des associations

<http://www.robindestoits.org>



<http://www.next-up.org>





"La téléphonie sans fil présente un problème de santé majeur" - Le NouvelObs - 25/03/2009

"Les effets des champs électromagnétiques sur notre santé sont démontrés", écrivent quatre scientifiques. Les risques: "maladie dégénérative du système nerveux, voire certains cancers".



"Les Vrais Dangers du Portable" - L'Express 07/08

Les ondes sont-elles un risque pour la santé ? La polémique est récurrente, l'inquiétude, croissante. Les scientifiques, eux, se divisent. L'Express ouvre le dossier et explore son volet le plus préoccupant : les antennes relais. Contrairement aux recommandations, certaines sont situées à moins de 100 mètres d'un établissement scolaire. Nous en publions la liste en exclusivité. Elle n'est sûrement pas exhaustive, mais confirme une évidence : la France prend moins de précautions que ses voisins.

"Les lobbies français ne veulent pas réduire la puissance des antennes pour des raisons financières" - chat Le Monde.fr - 21/04/2009

Dans un chat au Monde.fr, Michèle Rivasi, vice-présidente du Centre de recherche et d'information indépendantes sur les rayonnements électromagnétiques (Criirem) et tête de liste d'Europe Ecologie dans le Sud-Est, déplore l'utilisation intempestive d'appareils mettant en œuvre des ondes électromagnétiques dont on ne sait rien sur l'impact sanitaire pour les populations.

20 minutes
paris
Les ados de Reims réapparaissent
Le week-end, on arrête de criser
Coup d'Etat sur les antennes

SANTÉ PROBLÈME
Coup d'Etat sur les antennes
Le gouvernement s'apprête à modifier les normes de téléphonie mobile. La signature sur l'interdiction des antennes mobiles, plus tardée en France que dans le reste de l'Europe, pourrait être durcie. **1/4**

6 france
LE MONDE 11 OCTOBRE 2008
Santé
Les antennes craignent l'onde de choc
Les pouvoirs publics se hâtent pour trouver un compromis sur leur implantation

« Ma maison est devenue toxique »
Une puissance largement supérieure à nos voisins

Le « coup d'Etat »
L'Etat français a décidé de modifier les normes de téléphonie mobile. Cette décision est attendue avec intérêt par les habitants des zones d'implantation d'antennes.

Etudes et rapports

- Rapport Zmirou, Direction Générale de la Santé, 2001
<http://www.sante-sports.gouv.fr/rapport-zmirou-2001.html>
- Etude INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques) bibliographique sur la problématique fréquences et santé
http://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/et-ineris-dec02.zip
- Rapports de l'OPECST (Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques du Sénat)
Incidences éventuelles sur la santé de la téléphonie mobile
 - No. 52, 2002-2003
<http://www.senat.fr/rap/r02-052/r02-052.html>
 - No. 84, 2009-2010
<http://www.senat.fr/notice-rapport/2009/r09-084-1-notice.html>
- Rapport de l'AFSSET^a
(Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail), 2009
<http://www.afsset.fr/index.php?pageid=2456&parentid=424>

^aDepuis le 01/07/2010: l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire)

Etudes et rapports

- Etudes expérimentales
 - Système cardio-vasculaire
 - La reproduction et le développement
 - Le système immunitaire
 - Le système nerveux et le comportement
 - etc.
- Etudes épidémiologiques
 - Cas-témoin
 - Formation d'un groupe de personnes atteintes d'une maladie et d'un groupe témoin
 - Comparaison en tenant compte des facteurs causals
 - Cohorte
 - Formation d'une population (une cohorte) en fonction de la présence ou de l'absence d'un facteur susceptible d'influencer sur la probabilité d'apparition d'une maladie donnée
 - Suivi afin de déterminer si les sujets exposés au facteur présentent effectivement un risque plus élevé de développer la maladie

Etudes et rapports

- Etudes expérimentales
 - Système cardio-vasculaire
 - La reproduction et le développement
 - Le système immunitaire
 - Le système nerveux et le comportement
 - etc.
- Etudes épidémiologiques
 - Cas-témoin
 - Formation d'un groupe de personnes atteintes d'une maladie et d'un groupe témoin
 - Comparaison en tenant compte des facteurs causals
 - Cohorte
 - Formation d'une population (une cohorte) en fonction de la présence ou de l'absence d'un facteur susceptible d'influencer sur la probabilité d'apparition d'une maladie donnée
 - Suivi afin de déterminer si les sujets exposés au facteur présentent effectivement un risque plus élevé de développer la maladie

Rapport de l'AFSSET en 2009 (1/3)

Mise à jour des connaissances scientifiques relatives à l'ensemble des applications utilisant des champs électromagnétiques radiofréquences

<http://www.afsset.fr/index.php?pageid=2456&parentid=424>

Sur la base des principales conclusions de l'expertise conduite, l'AFSSET souligne tout particulièrement:

- le grand nombre de travaux menés au niveau international au cours des dernières années en vue d'identifier d'éventuels effets non thermiques des radiofréquences sur l'organisme;
- que néanmoins différentes gammes de fréquence, notamment les plus basses, ou certains types d'usage, notamment de type professionnel, souffrent d'une description encore limitée;
- la difficulté de recherche d'éventuels effets non thermiques (elle suppose la mise en oeuvre de méthodologies rigoureuses concernant la caractérisation des expositions aux champs radiofréquences et leur identification);

Rapport de l'AFFSET en 2009 (2/3)

- qu'à ce jour, les difficultés méthodologiques ont fragilisé les conclusions de bon nombre d'études qui présentent des lacunes diverses;
- que la majorité des études menées ne démontrent pas d'effets pour des expositions à des puissances non thermiques;
- que néanmoins différentes études, en nombre faible au regard du nombre de travaux disponibles, montrent des effets, notamment sur le mécanisme cellulaire in vitro, pour de telles expositions, **mais les résultats de ces études n'ont pu être répliqués par plusieurs études différentes;**
- que **la mise en évidence d'un effet biologique ne démontre pas l'existence d'un effet sanitaire associé;**
- que plus généralement **on ne peut formellement montrer l'inexistence d'un risque;**
- que les travaux disponibles ne permettent pas aujourd'hui d'identifier un mécanisme d'effet non thermique ni un mécanisme d'action cumulatif des radiofréquences;

Rapport de l'AFFSET en 2009 (3/3)

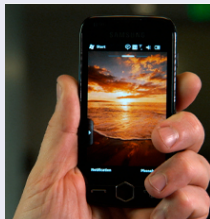
- que dans ce contexte, aucun effet non thermique ne permet de fonder de nouvelles valeurs limites réglementaires;
- que les études épidémiologiques disponibles ne suggèrent pas d'effets à court terme de la téléphonie mobile mais que **des interrogations subsistent s'agissant d'éventuels effets sur le long terme**;
- qu'un certain nombre de personnes ressentent des souffrances qu'elles attribuent à l'exposition aux radiofréquences mais qu'**à ce jour aucun mécanisme physiopathologique n'a été identifié pour décrire le lien avec l'exposition à ces radiofréquences**;
- que **la caractérisation de l'exposition des enfants aux radiofréquences et les effets éventuels associés sont mal décrits**;
- que les professionnels peuvent se voir exposés à des niveaux excédant les valeurs limites d'exposition recommandées;
- que le téléphone mobile reste très largement le principal mode d'exposition aux champs radiofréquences, en comparaison notamment à l'exposition générée par les antennes relais.

De nombreuses sources d'exposition

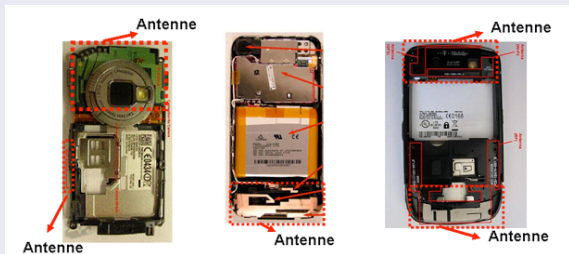
Systèmes de communication sans fil

- Technologies
 - GSM (850-900 MHz et 1800-1900 MHz)
 - UMTS
 - Wi-Fi, WiMAX
 - Bluetooth
 - etc.
- Systèmes
 - Téléphone mobile
 - Ordinateur portable
 - PDA
 - Console de jeux,
 - etc.

De nombreuses sources d'exposition



De nombreuses sources d'exposition



De nombreuses sources d'exposition



De nombreuses sources d'exposition



Le cas de la téléphonie mobile

- Différents usages
 - En fonction de l'âge
 - En fonction de la situation (lieu public, domicile, moyens de transport, etc.)
- Cas particuliers
 - Femmes enceintes
 - Personnes porteuses d'implants médicaux
- Paramètres importants pour la caractérisation de l'exposition
 - Localisation de la (ou des) source(s) i.e. antennes
 - Durée de la communication
 - Configuration morphologique des tissus (notamment, du crâne)

Risques indirects

- Accident par inattention humaine
 - Accident du travail, accident domestique, accident de la route
 - Effets statistiquement établis
- Perturbation d'appareils électroniques
 - Compatibilité électromagnétique
 - Cas des implants médicaux

Risques sanitaires

- Effets thermiques
 - Effets connus, à la base des dispositions réglementaires
- Effets non thermiques
 - Difficilement caractérisables
 - Au cœur des préoccupations actuelles

Risques indirects

- Accident par inattention humaine
 - Accident du travail, accident domestique, accident de la route
 - Effets statistiquement établis
- Perturbation d'appareils électroniques
 - Compatibilité électromagnétique
 - Cas des implants médicaux

Risques sanitaires

- Effets **thermiques**
 - Effets connus, à la base des dispositions réglementaires
- Effets **non thermiques**
 - Difficilement caractérisables
 - Au cœur des préoccupations actuelles

Conformité et réglementation

Les équipements radioélectriques liés aux systèmes de communication par radiofréquences doivent être conformes à deux réglementations qui sont distinctes et indépendantes l'une de l'autre, portant sur:

- l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques,
- la conformité en termes de compatibilité électromagnétique (CEM).

Tout équipement électrique ou électronique, y compris donc les équipements radioélectriques, doit satisfaire aux normes de compatibilité électromagnétique^a:

- un équipement électrique ou électronique ne doit pas produire des perturbations électromagnétiques à un niveau tel que cela empêcherait le fonctionnement normal des équipements situés à proximité,
- réciproquement, un équipement doit pouvoir fonctionner normalement en présence du niveau de champ électromagnétique qu'il peut rencontrer dans son environnement.

^aDécret No. 2006-1278 du 18 octobre 2006

Conformité et réglementation

Les équipements radioélectriques liés aux systèmes de communication par radiofréquences doivent être conformes à deux réglementations qui sont distinctes et indépendantes l'une de l'autre, portant sur:

- l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques,
- la conformité en termes de compatibilité électromagnétique (CEM).

Tout équipement électrique ou électronique, y compris donc les équipements radioélectriques, doit satisfaire aux normes de compatibilité électromagnétique^a:

- un équipement électrique ou électronique ne doit pas produire des perturbations électromagnétiques à un niveau tel que cela empêcherait le fonctionnement normal des équipements situés à proximité,
- réciproquement, un équipement doit pouvoir fonctionner normalement en présence du niveau de champ électromagnétique qu'il peut rencontrer dans son environnement.

^aDécret No. 2006-1278 du 18 octobre 2006

Valeurs limites d'exposition

Formulées par la Commission Internationale pour la Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP)

L'approche générale de l'ICNIRP pour la protection des rayonnements non ionisants fait l'objet d'un article scientifique publié en 2003

L'ICNIRP examine dans cette publication l'ensemble des effets sur la santé documentés dans la littérature, mais ne considère que ceux réputés avérés au cours de cet exercice d'analyse, pour établir des limites d'exposition

Suivant le niveau d'exposition considéré, plusieurs effets peuvent être identifiés et l'ICNIRP définit comme **effet critique** l'effet qui se révèle au niveau le plus bas

Les limites d'exposition sont définies de façon à prévenir l'effet critique et donc, à plus forte raison, tout effet nuisible pour la santé

Valeurs limites d'exposition

Formulées par la Commission Internationale pour la Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP)

L'approche générale de l'ICNIRP pour la protection des rayonnements non ionisants fait l'objet d'un article scientifique publié en 2003

L'ICNIRP examine dans cette publication l'ensemble des effets sur la santé documentés dans la littérature, mais ne considère que ceux réputés avérés au cours de cet exercice d'analyse, pour établir des limites d'exposition

Suivant le niveau d'exposition considéré, plusieurs effets peuvent être identifiés et l'ICNIRP définit comme **effet critique** l'effet qui se révèle au niveau le plus bas

Les limites d'exposition sont définies de façon à prévenir l'effet critique et donc, à plus forte raison, tout effet nuisible pour la santé

Valeurs limites d'exposition

L'ICNIRP, comme la grande majorité de la communauté scientifique, considère que les seuls effets sanitaires avérés des champs électromagnétiques radiofréquences sont les **effets thermiques** dus à l'absorption d'énergie électromagnétique par les tissus vivants

Les recommandations de l'ICNIRP pour les champs électromagnétiques radiofréquences visent donc à **limiter l'augmentation de la température dans le corps humain ou dans ses organes**, par une limitation de l'absorption de puissance électromagnétique

Dans le domaine des radiofréquences supérieures à 10 MHz, le paramètre de référence qui permet de quantifier la dissipation d'énergie dans la matière vivante est le débit d'absorption spécifique (DAS)

Chez les animaux, les premiers effets apparaissent à partir d'un seuil de 4 W/Kg (corps entier)

Un facteur de sécurité de 10 a été choisi pour obtenir la limite de **0.4 W/Kg pour les travailleurs** et, avec un facteur de réduction supplémentaire de 5, on aboutit à la restriction de base de **0.08 W/Kg pour le public**

Restrictions sur le **DAS local**: 2 W/Kg pour la tête et le tronc, et 4 W/Kg pour les autres membres

Valeurs limites d'exposition

L'ICNIRP, comme la grande majorité de la communauté scientifique, considère que les seuls effets sanitaires avérés des champs électromagnétiques radiofréquences sont les **effets thermiques** dus à l'absorption d'énergie électromagnétique par les tissus vivants

Les recommandations de l'ICNIRP pour les champs électromagnétiques radiofréquences visent donc à **limiter l'augmentation de la température dans le corps humain ou dans ses organes**, par une limitation de l'absorption de puissance électromagnétique

Dans le domaine des radiofréquences supérieures à 10 MHz, le paramètre de référence qui permet de quantifier la dissipation d'énergie dans la matière vivante est le débit d'absorption spécifique (DAS)

Chez les animaux, les premiers effets apparaissent à partir d'un seuil de 4 W/Kg (corps entier)

Un facteur de sécurité de 10 a été choisi pour obtenir la limite de **0.4 W/Kg pour les travailleurs** et, avec un facteur de réduction supplémentaire de 5, on aboutit à la restriction de base de **0.08 W/Kg pour le public**

Restrictions sur le **DAS local**: 2 W/Kg pour la tête et le tronc, et 4 W/Kg pour les autres membres

- 1 Contextes
- 2 Interactions ondes - matière vivante**
- 3 Mesure de l'exposition
- 4 Propagation d'ondes électromagnétiques
- 5 Modélisation numérique

- Les interactions des champs électromagnétiques non ionisants avec les organismes vivants peuvent être de différentes natures: **circulation de courants** et **échauffement des tissus**
- Les phénomènes biologiques pris en compte pour prévenir des effets sanitaires dépendent de l'interaction des ondes avec la matière à la fréquence considérée
- Ils s'expriment différemment en fonction du type de champ (électrique ou magnétique) et de sa fréquence
- Jusqu'à 100 kHz, il s'agit des champs et courants pouvant entraîner la stimulation de tissus excitables (système nerveux et muscles)
- Au-dessus de 10 MHz, **l'absorption** des radiofréquences devient prédominante et **l'échauffement** le mécanisme essentiel
- Aux fréquences intermédiaires, entre 100 kHz et 10 MHz, il y a un mélange des deux phénomènes

- Les champs radiofréquences (RF) peuvent déplacer des charges électriques ou orienter des molécules polarisées
- Les systèmes biologiques contenant des ions et des molécules polaires en grand nombre sont donc susceptibles d'être perturbés par ces interactions
- Lorsqu'un tissu biologique est soumis à un champ RF, seule une partie du champ est absorbée par le milieu, l'autre étant réfléchi ou transmise
- Le rayonnement qui pénètre dans le tissu est absorbé plus ou moins rapidement en fonction des constantes diélectriques (permittivité) de la matière traversée ainsi que de la longueur d'onde du rayonnement
 - ⇒ Plus la longueur d'onde est grande plus l'onde pénètre
 - ⇒ Plus le tissu a une conductivité électrique importante plus l'onde est réfléchi et moins elle se propage dans le système

- Les champs radiofréquences (RF) peuvent déplacer des charges électriques ou orienter des molécules polarisées
- Les systèmes biologiques contenant des ions et des molécules polaires en grand nombre sont donc susceptibles d'être perturbés par ces interactions
- Lorsqu'un tissu biologique est soumis à un champ RF, seule une partie du champ est absorbée par le milieu, l'autre étant réfléchi ou transmise
- Le rayonnement qui pénètre dans le tissu est absorbé plus ou moins rapidement en fonction des **constantes diélectriques (permittivité)** de la matière traversée ainsi que de la **longueur d'onde** du rayonnement
 - ⇒ Plus la longueur d'onde est grande plus l'onde pénètre
 - ⇒ Plus le tissu a une conductivité électrique importante plus l'onde est réfléchi et moins elle se propage dans le système

- Cependant l'absorption dépend également des dimensions et de l'orientation du grand axe de la zone exposée par rapport au champ électrique
- L'énergie électromagnétique est préférentiellement absorbée pour certaines fréquences i.e. les fréquences de résonance (pour ces fréquences, la longueur d'onde du champ RF et la longueur du système sont égales ou multiples)
- Cette particularité est responsable de la sensibilité préférentielle de certains organes pour certaines fréquences
- Ainsi la rétine et le cristallin seront plus sensibles à un champ de 9 GHz, les organes creux tel que l'estomac ou l'intestin grêle à un champ de 3 GHz

Grandeurs physiques d'intérêt

	Gamme de fréquences	Grandeur physique	Unités	Effets à l'origine des valeurs limites visant à prévenir les effets sanitaires	
Radiofréquences ↑ ↓	0 - 1 Hz	Induction magnétique pour les champs statiques (fréquence nulle)	T	Stimulation musculaire	Système cardiovasculaire / charges électriques de surface - induction de champ électrique dans les tissus en mouvement
		Densité de courants pour les champs variables dans le temps	A/m ²		Système nerveux central
	1 Hz - 100 kHz	Densité de courants	A/m ²		Système nerveux
	100 kHz - 10 MHz	Densité de courant et débit d'absorption spécifique	A/m ² W/kg		Système nerveux Stress thermique généralisé du corps, Échauffement localisé
	10 MHz - 10 GHz	Débit d'absorption spécifique	W/kg	Échauffement	Stress thermique généralisé du corps Échauffement localisé
	10 GHz - 300 GHz	Densité de puissance	W/m ²		Tissus à la surface ou proches de la surface du corps
	300 GHz – Rayonnements ionisants	Énergie des photons	eV		Tissus à la surface ou proches de la surface du corps, réaction photochimique

Effets biologiques, thermiques et sanitaires

L'observation d'un **effet biologique** ne signifie pas forcément qu'il entraîne un dommage et encore moins qu'il se traduise par un **effet sur la santé**.

Le corps humain est soumis en permanence à un ensemble de stimuli internes et externes, entraînant éventuellement des réactions biologiques d'adaptation, ayant un impact sur les cellules, le fonctionnement des organes et la santé

Un impact sur la santé n'intervient que lorsque des effets biologiques entraînés par une agression dépassent les limites d'adaptation du système biologique considéré

Effets biologiques, thermiques et sanitaires

Concernant les RF, on distingue souvent les **effets thermiques** des **effets non thermiques**

- Les effets thermiques désignent les effets biologiques qui peuvent être mis en évidence sur des modèles de cultures cellulaires, animaux ou humains, lorsque l'on observe une augmentation de température des cellules ou des tissus, consécutive à une exposition aux radiofréquences
- L'effet thermique résulte de la forte teneur en eau de la matière vivante
- De nombreuses études expérimentales ont permis de définir que le seuil d'apparition d'un effet thermique correspond à une hausse de 1°C de la température corporelle chez l'homme, c'est à dire un DAS pour le corps entier de 4 W/Kg environ
- Au-dessous de cette valeur, le système de thermorégulation de l'organisme exposé est capable de maintenir la température corporelle, car la vascularisation des tissus biologiques permet l'évacuation de la chaleur

Effets biologiques, thermiques et sanitaires

Concernant les RF, on distingue souvent les **effets thermiques** des **effets non thermiques**

- Les effets non thermiques sont des effets observés sur les systèmes biologiques, alors que la quantité d'énergie absorbée est trop faible pour induire une élévation de la température
- Contrairement aux effets thermiques, le mécanisme de ces effets n'est pas connu avec certitude et semble avoir des origines multiples
- Les hypothèses explicatives évoquent des micro échauffements locaux, des changements de conformation moléculaire, des perturbations enzymatiques, des modifications de répartition ionique
- Il existe un grand nombre d'effets non thermiques décrits, tels que des effets cellulaires (promotion de cancers notamment), endocriniens, immunologiques, neurobiologiques, mais aussi l'existence d'effets potentialisateurs associés avec d'autres agents agressifs

- 1 Contextes
- 2 Interactions ondes - matière vivante
- 3 Mesure de l'exposition**
- 4 Propagation d'ondes électromagnétiques
- 5 Modélisation numérique

L'indice DAS, qu'est-ce que c'est ?

DAS: Débit dAbsorption Spécifique

Débit avec lequel l'énergie produite par un équipement est absorbée par une unité de masse du tissu du corps (en W/kg), mesuré sur l'ensemble du corps ou sur une de ses parties

Permet d'évaluer le niveau d'émission maximale d'ondes électromagnétiques radiofréquences d'un système de communication sans fil sur un organisme biologique

Indice DAS et téléphone mobile

Tout téléphone mobile possède un indice DAS

Depuis la parution du décret du 8 Octobre 2003, les mobiles destinés à être utilisés en France doivent présenter un indice DAS inférieur à 2 W/Kg au niveau du tronc et de la tête

L'indice DAS, qu'est-ce que c'est ?

DAS: Débit dAbsorption Spécifique

Débit avec lequel l'énergie produite par un équipement est absorbée par une unité de masse du tissu du corps (en W/kg), mesuré sur l'ensemble du corps ou sur une de ses parties

Permet d'évaluer le niveau d'émission maximale d'ondes électromagnétiques radiofréquences d'un système de communication sans fil sur un organisme biologique

Indice DAS et téléphone mobile

Tout téléphone mobile possède un indice DAS

Depuis la parution du décret du 8 Octobre 2003, les mobiles destinés à être utilisés en France doivent présenter **un indice DAS inférieur à 2 W/Kg** au niveau du tronc et de la tête

L'indice DAS, qu'est-ce que c'est ?

Le DAS peut être calculé à partir de différents formules

- A partir du **champ électrique** dans les tissus: $DAS = \frac{\sigma E^2}{\rho}$
- A partir de la **densité de courant** dans les tissus: $DAS = \frac{J^2}{\rho \sigma}$
- De l'élévation de **température** dans les tissus: $DAS = c_i \frac{dT}{dt}$

E: champ électrique en V/m

J: densité de courant en A/m²

ρ : densité du tissu en Kg/m³

σ : conductivité électrique du tissu en S/m

c_i : capacité thermique du tissu en J/(Kg K)

dT/dt : variation de la température des tissus par rapport au temps en K/s

Comment mesurer le DAS ?

La détermination de l'indice DAS nécessite l'utilisation d'une sonde ce qui complique les expériences sur des êtres vivants

Les laboratoires qui effectuent ces mesures utilisent tous les mêmes procédures de tests définies par le CENELEC
(Comité Européen de Normalisation ÉLECctrotechnique)

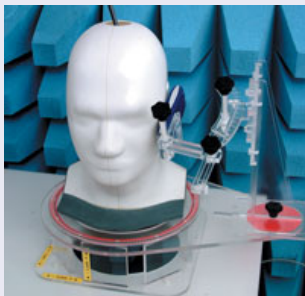
Le téléphone est collé à une tête de mannequin remplie d'un liquide possédant des propriétés de propagation des ondes identiques à celles du cerveau humain

Il émet ensuite à pleine puissance selon diverses orientations

Les capteurs mesurent la puissance absorbée par la tête et le tronc par le biais du champ électrique ou de la température

Dans la pratique, le niveau d'exposition réel est généralement inférieur à cette valeur

Comment mesurer le DAS ?



Principales limitations de cette approche:

- les tissus de la tête constituent un milieu de propagation hétérogène,
- il n'est pas possible de prendre en compte les différences morphologiques inter-individus et inter-âges.

Comment mesurer le DAS ?



Principales limitations de cette approche:

- les tissus de la tête constituent un milieu de propagation hétérogène,
- il n'est pas possible de prendre en compte les différences morphologiques inter-individus et inter-âges.

- 1 Contextes
- 2 Interactions ondes - matière vivante
- 3 Mesure de l'exposition
- 4 Propagation d'ondes électromagnétiques**
- 5 Modélisation numérique

Quelques généralités sur les champs électromagnétiques

- Les rayonnements électromagnétiques sont une forme de transport d'énergie sans support matériel
- Très divers par la quantité d'énergie qu'ils transportent et leurs possibilités d'interactions avec la matière, ils peuvent être décrits par deux **modèles physiques** complémentaires:
 - soit comme un flux de photons (modèle corpusculaire),
 - soit comme une **onde électromagnétique** (modèle ondulatoire).
- On distingue classiquement les rayonnements ionisants des rayonnements non ionisants
- Contrairement aux rayonnements non ionisants, les rayonnements ionisants (rayons X et Gamma notamment) sont suffisamment énergétiques pour provoquer des modifications des molécules de la matière vivante par ionisation

Quelques généralités sur les champs électromagnétiques

- Les rayonnements électromagnétiques sont une forme de transport d'énergie sans support matériel
- Très divers par la quantité d'énergie qu'ils transportent et leurs possibilités d'interactions avec la matière, ils peuvent être décrits par deux **modèles physiques** complémentaires:
 - soit comme un flux de photons (modèle corpusculaire),
 - soit comme une **onde électromagnétique** (modèle ondulatoire).
- On distingue classiquement les rayonnements ionisants des rayonnements non ionisants
- Contrairement aux rayonnements non ionisants, les rayonnements ionisants (rayons X et Gamma notamment) sont suffisamment énergétiques pour provoquer des modifications des molécules de la matière vivante par ionisation

Quelques généralités sur les champs électromagnétiques

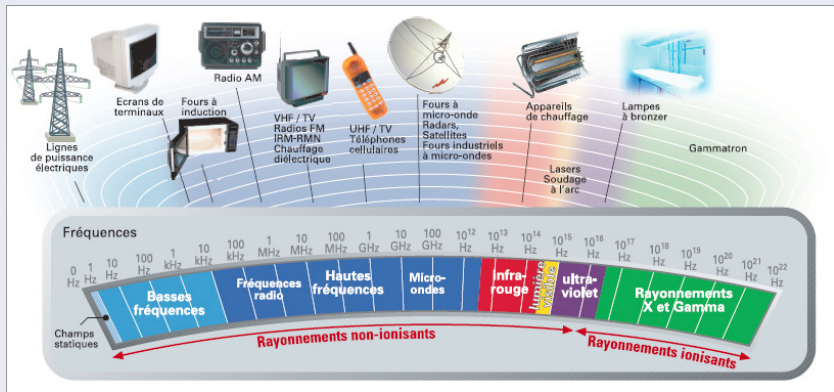
- Les rayonnements non ionisants comprennent,
 - les champs électromagnétiques statiques,
 - les champs électromagnétiques basses fréquences,
 - les **champs électromagnétiques radiofréquences**,
 - les rayonnements infrarouges,
 - la lumière visible et une partie des rayonnements ultraviolets.
- Il existe des champs électromagnétiques d'origine naturelle dus par exemple à la présence de charges électriques dans l'atmosphère et aux courants électriques qui circulent à la surface de la terre
- La valeur du champ électrique terrestre statique est ainsi de l'ordre de quelques dizaines de V/m, jusqu'à quelques dizaines de milliers de V/m par temps d'orage

Quelques généralités sur les champs électromagnétiques

- Les rayonnements non ionisants comprennent,
 - les champs électromagnétiques statiques,
 - les champs électromagnétiques basses fréquences,
 - les **champs électromagnétiques radiofréquences**,
 - les rayonnements infrarouges,
 - la lumière visible et une partie des rayonnements ultraviolets.
- Il existe des champs électromagnétiques d'origine naturelle dus par exemple à la présence de charges électriques dans l'atmosphère et aux courants électriques qui circulent à la surface de la terre
- La valeur du champ électrique terrestre statique est ainsi de l'ordre de quelques dizaines de V/m, jusqu'à quelques dizaines de milliers de V/m par temps d'orage

Propagation d'ondes électromagnétiques

Spectre électromagnétique



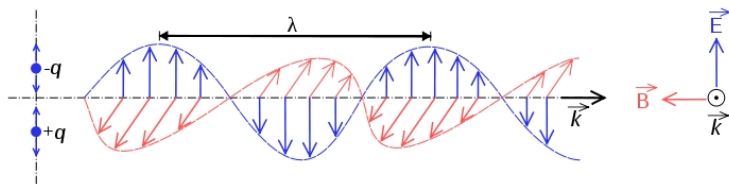
Propagation d'ondes électromagnétiques

Utilisation du spectre des radiofréquences

Bande de fréquences	Services / Applications
9 kHz – 30 MHz	Radiodiffusion Grandes Ondes, Ondes Moyennes et Ondes Courtes - Détecteurs de victimes d'avalanches - Trafic amateur - Systèmes de détection antivol (RFID) - Lecteur de cartes sans contact (RFID) - Applications médicales (*)
30 MHz – 87,5 MHz	Télédiffusion analogique et numérique (bande I) - Réseaux professionnels (taxis, pompiers, gendarmerie nationale, réseaux radioélectriques indépendants, etc.) - Radioamateurs - Microphones sans fil - Radiolocalisation aéronautique - Radars - Applications médicales (*)
87,5 – 108 MHz	Radiodiffusion en modulation de fréquences (bande FM)
108 – 136 MHz	Trafic aéronautique (balisage et bande « air »)
136 – 400 MHz	Télédiffusion analogique et numérique (bandes II et III) - Réseaux professionnels (police, pompier, SAMU, etc.) - Fréquences réservées au vol libre (<i>talkies walkies</i>) - Trafic amateur (bande « des 2 mètres ») - Trafic maritime (bandes VHF marine) - Radiomessagerie ERMES
400 – 470 MHz	Balise ARGOS - Réseaux professionnels (gendarmerie, SNCF, EDF...) - Trafic amateur (bande « 432 ») - Télécommandes et télémétrie médicale - Systèmes de commande (automobile (RFID) - Réseaux cellulaires TETRA et TETRAPOL - Applications médicales*)
470 – 860 MHz	Télédiffusion bandes IV et V (analogique et numérique)
860 – 880 MHz	Bande ISM (Industriel, Scientifique, Médical) : appareils à faible portée de type alarmes, télécommandes, domotique, capteurs sans fil, RFID
880 – 960 MHz	Téléphonie mobile GSM 900 : voies montantes et voies descendantes
960 – 1710 MHz	Radiodiffusion numérique - Réseaux privés - Faisceaux Hertzien
1710 – 1880 MHz	Téléphonie mobile GSM 1800 : voies montantes et voies descendantes
1880 – 1900 MHz	Téléphones sans fil DECT
1920 – 2170 MHz	Téléphonie mobile UMTS
2400 – 2500 MHz	Bande ISM : réseaux Wi-Fi - Bluetooth - Four micro-onde
3400 – 3600 MHz	Boucle locale radio large bande de type WiMAX
>3600 MHz	Radars - Boucle locale radio - Stations terriennes - Faisceaux Hertzien

Caractéristiques d'une onde électromagnétique

- Le champ électromagnétique définit les **propriétés électriques et magnétiques** de l'espace (dans l'air, dans la matière ou dans le vide)
- Lorsque ces propriétés varient dans le temps et l'espace, par exemple sous l'influence d'une source de rayonnement électromagnétique (antenne de télédiffusion, radar, etc.), on définit alors **une onde électromagnétique** qui se **propage**



Caractéristiques d'une onde électromagnétique

- L'onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques dont les principales sont:
 - la fréquence - f
Elle correspond au nombre d'oscillations par seconde des ondes électrique et magnétique. Elle s'exprime en Hertz (Hz) et ses multiples
 - la longueur d'onde - λ
La longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence: plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est petite. Elle s'exprime en mètre et ses multiples
 - l'intensité du champ électrique - E
Elle représente la valeur du champ électrique en un point donné. Elle s'exprime en Volt par mètre (V/m)
 - l'intensité du champ magnétique - H
Elle représente la valeur du champ magnétique, qui s'exprime en Ampère par mètre (A/m). On parle également d'induction magnétique B qui s'exprime en Tesla (T)

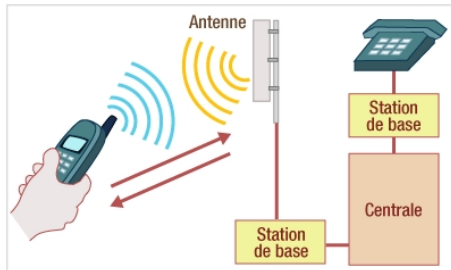
Caractéristiques d'une onde électromagnétique

- La puissance d'émission - P
 - La notion de puissance d'un émetteur, qui s'exprime en Watts ou en décibels, est complexe et peut être décrite sous différentes formes
 - On définit ainsi la puissance électrique qui est fournie à l'émetteur (ou puissance injectée)
 - Cependant, pour évaluer le rayonnement d'un émetteur dans l'environnement, il est indispensable de prendre aussi en compte le diagramme de rayonnement de l'émetteur
 - Dans le cas d'un émetteur omnidirectionnel, la puissance est émise uniformément dans toutes les directions de l'espace; dans le cas d'un émetteur directionnel, la puissance est émise principalement dans certaines directions
 - Dans l'espace, en l'absence de tout obstacle, l'onde se propage de façon rectiligne dans toutes les directions et l'énergie se répartit sur une surface de plus en plus grande

Propagation d'ondes électromagnétiques

Fonctionnement d'un téléphone mobile

- 1 Le téléphone transforme la voix en champs radiofréquences (RF)
- 2 Les champs RF se propagent par l'intermédiaire de l'antenne du téléphone jusqu'à une antenne relais (station de base)
- 3 Le signal est ensuite transmis par le réseau jusqu'au correspondant
- 4 Chaque antenne relais couvre une portion de territoire constituant une cellule, d'où le nom de téléphonie cellulaire



- Les champs utilisés dans la téléphonie mobile sont standardisés selon différents systèmes en fonction des régions et des pays
- En France, les 2 systèmes actuels sont le GSM 900 (fréquence porteuse entre 872 et 960 MHz) et le GSM 1800, plus récent (fréquence porteuse de 1710 à 1875 MHz)
- Le système UMTS se met progressivement en place à une fréquence autour de 1900 MHz
- La puissance d'émission des téléphones est limitée au maximum à 2 W pour le GSM 900 et 1 W pour le GSM 1800
- Cette puissance est de plus régulée en fonction de la distance à l'antenne relais: elle est inversement proportionnelle à la qualité de la communication (250 mW à plusieurs km de l'antenne, 10 mW ou moins à proximité)

Propagation d'ondes électromagnétiques

- Lors de la connexion de l'utilisateur du mobile avec son correspondant, la puissance émise est ajustée à un niveau élevé permettant d'avoir une communication immédiate optimale
- Puis le contrôle de puissance la réduit par paliers en quelques secondes, jusqu'à se stabiliser au niveau minimum compatible avec une bonne qualité de la communication
- Le déplacement de l'utilisateur provoque la prise de relais successifs par plusieurs stations de base, chacune démarrant sa communication à un niveau élevé puis diminuant sa puissance
- C'est donc lors de l'utilisation d'un mobile en situation de déplacement que l'exposition aux RF est la plus élevée ou bien lors d'une conversation dans un lieu de médiocre réception qui astreint l'antenne relais et le mobile à rester à des niveaux de puissance élevés
- La puissance d'émission d'un mobile est nettement inférieure à celle d'une station de base, cependant le téléphone n'étant qu'à quelques millimètres de l'oreille, la puissance absorbée par l'organisme lors d'une conversation est beaucoup plus importante que celle due à une station de base

- 1 Contextes
- 2 Interactions ondes - matière vivante
- 3 Mesure de l'exposition
- 4 Propagation d'ondes électromagnétiques
- 5 Modélisation numérique**

Prise en compte des caractéristiques des tissus

- Hétérogénéité spatiale
- Dispersion physique

Etudes paramétriques, modélisation des incertitudes

- Morphologie (inter-individus, inter-âges)
- Caractéristiques électromagnétiques des tissus
- Caractéristiques et positionnement de la source

Calcul du DAS (local, 1 g, 10 g)

$$\text{DAS}(\mathbf{x}) = \frac{\sigma(\mathbf{x})|\bar{\mathbf{E}}(\mathbf{x})|^2}{\rho(\mathbf{x})}$$

- $\bar{\mathbf{E}}(\mathbf{x})$: champ électrique fréquentiel
- $\sigma(\mathbf{x})$: conductivité électrique
- $\rho(\mathbf{x})$: densité volumique

Calcul des effets thermiques

- Energie électrique dissipée dans les tissus
- Echanges thermiques avec une source externe (e.g. téléphone)

Modélisation géométrique

- A partir d'images médicales
- Mise en œuvre d'outils de traitement d'images:
 - segmentation,
 - raffinement/déaffinement (résolution),
 - déformation (positionnement, morphologie).

Modélisation numérique

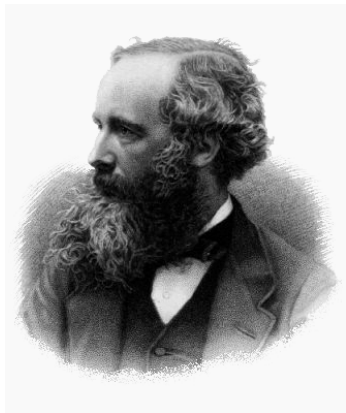
- Mise en équations
 - Propagation EM: équations de Maxwell (instationnaires ou fréquentielles)
 - Thermique: équation de la biochaleur (différents modèles)
- Traitement numérique
 - Choix d'une méthode
 - Modélisation de la source EM
 - Construction des maillages de calcul (EM et thermique)

Modélisation géométrique

- A partir d'images médicales
- Mise en œuvre d'outils de traitement d'images:
 - segmentation,
 - raffinement/déaffinement (résolution),
 - déformation (positionnement, morphologie).

Modélisation numérique

- Mise en équations
 - Propagation EM: équations de Maxwell (instationnaires ou fréquentielles)
 - Thermique: équation de la biochaleur (différents modèles)
- Traitement numérique
 - Choix d'une méthode
 - Modélisation de la source EM
 - Construction des maillages de calcul (EM et thermique)



James Clerk Maxwell (1831-1879)

Les équations de Maxwell

$$\begin{cases} \varepsilon(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \nabla \times \mathbf{H} = -\mathbf{J} \\ \mu(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0 \end{cases}$$

- $\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{x}, t)$: champ électrique
- $\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{x}, t)$: champ magnétique
- $\varepsilon(\mathbf{x})$: permittivité électrique
- $\mu(\mathbf{x})$: perméabilité magnétique
- $\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{x}, t)$: densité de courant électrique ($\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_{ext}$)
 - Milieux conducteurs: $\mathbf{J}_c = \sigma \mathbf{E}$
 - $\sigma(\mathbf{x})$: conductivité électrique

Equation de la biochaleur

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) - \beta(T - T_a) + Q_m + Q_{ext}$$

- $T = T(\mathbf{x}, t)$: température
- $\kappa(\mathbf{x})$: conductivité thermique des tissus
- T_a : température du sang dans les artères
- β : coefficient de perfusion
- Terme sources
 - $Q_{ext}(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x})DAS(\mathbf{x})$
 - $Q_m(\mathbf{x})$: source volumique de chaleur due au métabolisme
- Echanges thermiques à l'interface air/peau : $\nabla T \cdot \mathbf{n}_{ext} = -h(T - T_{ext})$
 - $h = h_{rad} + h_{conv} + h_{evap}$: coefficient de transfert thermique

Modélisation numérique

Principes (résolution numérique des équations de Maxwell)

- Les équations de Maxwell modélisent l'évolution du champ électromagnétique (\mathbf{E} , \mathbf{H}) en tous points de l'espace \mathbf{x} à tout instant t
- En théorie, la propagation de l'onde a lieu dans un domaine non borné
- En pratique, on doit résoudre ces équations dans un domaine borné (notion de **domaine de calcul**) sur un intervalle de temps fini
- La résolution directe (i.e. **exacte**) des équations de Maxwell est presque toujours impossible
⇒ Résolution numérique (i.e. **approchée**)

Résolution numérique des équations de Maxwell

- 1 Définition d'un domaine de calcul
- 2 Discrétisation du domaine de calcul
- 3 Mise au point d'une méthode numérique

- Approximation de $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}}$
- Approximation de $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$
- Idem pour \mathbf{H}

⇒ Formule de calcul de \mathbf{E} et \mathbf{H} en un ensemble de points \mathbf{x}_j de l'espace et à des instants t^n entre 0 et T

- 4 Développement d'un logiciel de simulation

Sur la modélisation géométrique

- Représentation fidèle des structures anatomiques des tissus
- Troncature artificielle du domaine de propagation

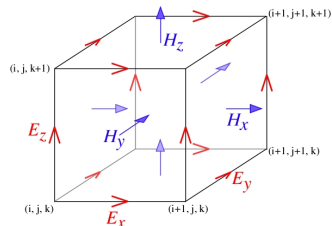
Sur la méthodologie numérique

- Précision et convergence
- Coûts de calcul et de stockage mémoire
- Complexité de mise en œuvre

Méthodes en maillages structurés

Méthode DFDT (Différences Finies en Domaine Temporel)

- K.S. Yee (IEEE Trans. Antennas and Propag., 1966)
- A. Taflove, S.C. Hagness (Artech House Publishers, 2005)
- Méthode prévalente en dosimétrie numérique



Méthode DFDT (Différences Finies en Domaine Temporel)

- Avantages
 - Simplicité de mise en œuvre
 - Performance computationnelle
 - Maillage de calcul directement déduit des images (voxels)
 - Prise en compte de modèles physiques et de sources complexes (matériaux dispersifs, fils minces, etc.)
- Inconvénients
 - Précision en maillage non-uniforme
 - Occupation mémoire dans le cas de modèles haute résolution en maillage uniforme
 - Représentation approchée (en marches d'escalier) de surfaces
- Améliorations
 - Stratégies de sous-maillage
 - Méthode hybride EFDT/DFDT

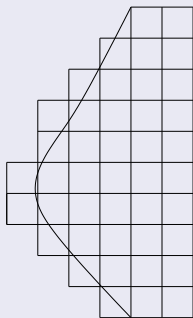
Méthode DFDT (Différences Finies en Domaine Temporel)

- Avantages
 - Simplicité de mise en œuvre
 - Performance computationnelle
 - Maillage de calcul directement déduit des images (voxels)
 - Prise en compte de modèles physiques et de sources complexes (matériaux dispersifs, fils minces, etc.)
- Inconvénients
 - Précision en maillage non-uniforme
 - Occupation mémoire dans le cas de modèles haute résolution en maillage uniforme
 - Représentation approchée (en marches d'escalier) de surfaces
- Améliorations
 - Stratégies de sous-maillage
 - Méthode hybride EFDT/DFDT

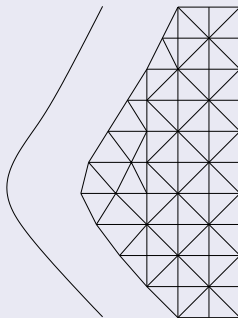
Méthode DFDT (Différences Finies en Domaine Temporel)

- Avantages
 - Simplicité de mise en œuvre
 - Performance computationnelle
 - Maillage de calcul directement déduit des images (voxels)
 - Prise en compte de modèles physiques et de sources complexes (matériaux dispersifs, fils minces, etc.)
- Inconvénients
 - Précision en maillage non-uniforme
 - Occupation mémoire dans le cas de modèles haute résolution en maillage uniforme
 - Représentation approchée (en marches d'escalier) de surfaces
- Améliorations
 - Stratégies de sous-maillage
 - Méthode hybride EFDT/DFDT

Méthode DFDT (Différences Finies en Domaine Temporel)



FDM



FEM/FVM

Caractéristiques de la propagation EM en milieu hétérogène:

- variabilité inter-tissus de ϵ , σ et ρ ,
- discontinuités de \mathbf{E} et \mathbf{H} aux interfaces entre tissus.

Méthodes en maillages non-structurés

- Formulations VFDT (Volumes Finis) et EFDT (Eléments Finis)
- Avantages
 - Discrétisation fidèle des interfaces inter-tissus
 - Adaptation (raffinement/déraffinement) de la discrétisation
 - Approximation colocalisée des composantes du champ EM
 - Flexibilité vis-à-vis de l'hétérogénéité des tissus
- Inconvénients
 - Complexité de mise en œuvre
 - Temps de calcul
 - Modélisation géométrique (génération de maillage)
 - Inversion d'un système linéaire (matrice de masse) dans le cas EF
- Peu de travaux en dosimétrie numérique

Méthodes en maillages non-structurés

- Formulations VFDT (Volumes Finis) et EFDT (Eléments Finis)
- Avantages
 - Discrétisation fidèle des interfaces inter-tissus
 - Adaptation (raffinement/déraffinement) de la discrétisation
 - Approximation colocalisée des composantes du champ EM
 - Flexibilité vis-à-vis de l'hétérogénéité des tissus
- Inconvénients
 - Complexité de mise en œuvre
 - Temps de calcul
 - Modélisation géométrique (génération de maillage)
 - Inversion d'un système linéaire (matrice de masse) dans le cas EF
- Peu de travaux en dosimétrie numérique

Méthodes en maillages non-structurés

- Formulations VFDT (Volumes Finis) et EFDT (Eléments Finis)
- Avantages
 - Discrétisation fidèle des interfaces inter-tissus
 - Adaptation (raffinement/déraffinement) de la discrétisation
 - Approximation colocalisée des composantes du champ EM
 - Flexibilité vis-à-vis de l'hétérogénéité des tissus
- Inconvénients
 - Complexité de mise en œuvre
 - Temps de calcul
 - Modélisation géométrique (génération de maillage)
 - Inversion d'un système linéaire (matrice de masse) dans le cas EF
- Peu de travaux en dosimétrie numérique

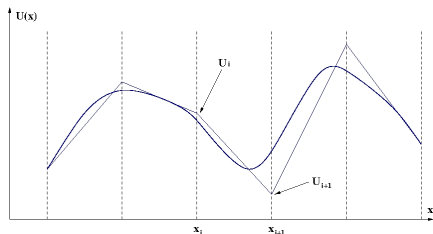
Méthodes en maillages non-structurés

- Formulations VFDT (Volumes Finis) et EFDT (Eléments Finis)
- Avantages
 - Discrétisation fidèle des interfaces inter-tissus
 - Adaptation (raffinement/déraffinement) de la discrétisation
 - Approximation colocalisée des composantes du champ EM
 - Flexibilité vis-à-vis de l'hétérogénéité des tissus
- Inconvénients
 - Complexité de mise en œuvre
 - Temps de calcul
 - Modélisation géométrique (génération de maillage)
 - Inversion d'un système linéaire (matrice de masse) dans le cas EF
- Peu de travaux en dosimétrie numérique

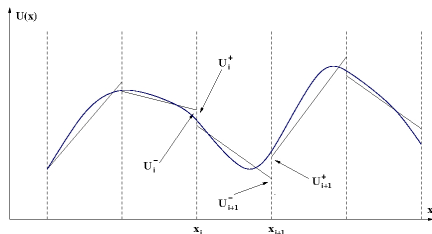
Méthodes en maillages non-structurés

Méthode GDDT (Galerkin Discontinue en Domaine Temporel)

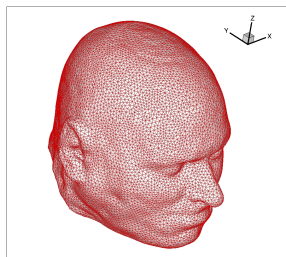
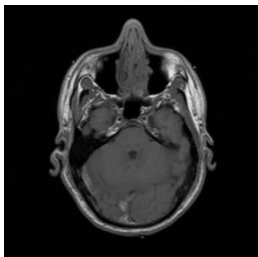
- A mi-chemin entre les formulations VFDT et EFDT
- Naturellement adaptées à la prise en compte de **discontinuités**
- Aisément combinables avec des approximations d'ordre élevé du champ EM



Approximation EF

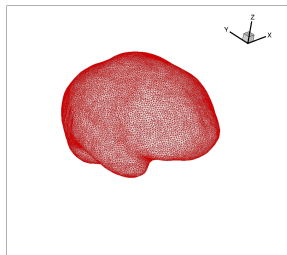
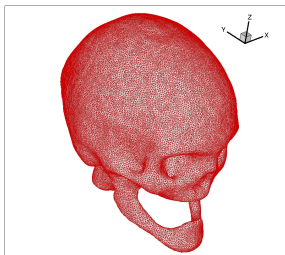
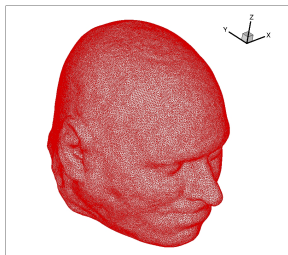
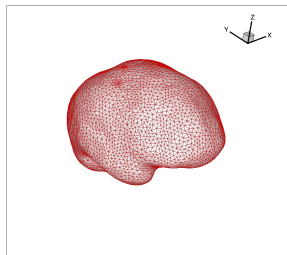
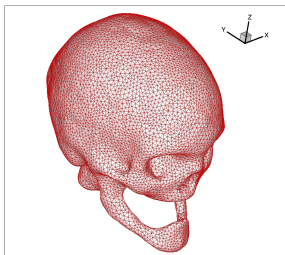
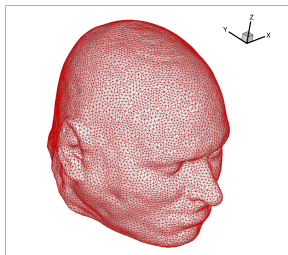


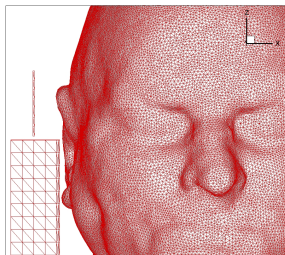
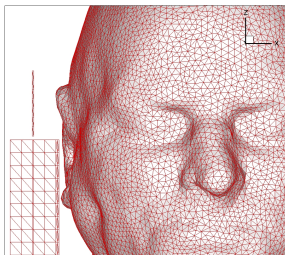
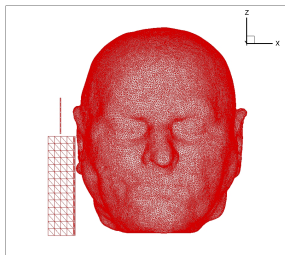
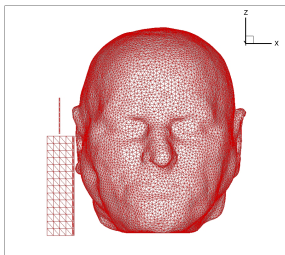
Approximation GD



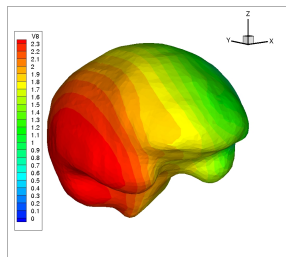
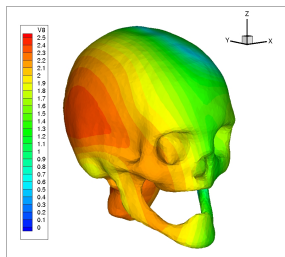
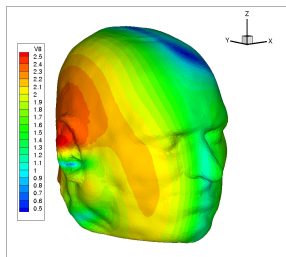
Modélisation géométrique

- 1 Extraction de maillages surfaciques des interfaces entre tissus
 - Collaboration avec des spécialistes du [traitement d'images médicales](#)
⇒ Conférence de Grégoire Malandain le 19/11/2010
- 2 Génération de maillages tétraédriques

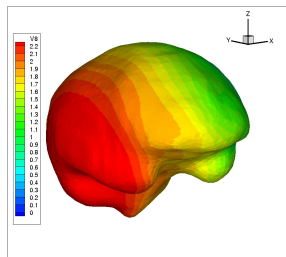
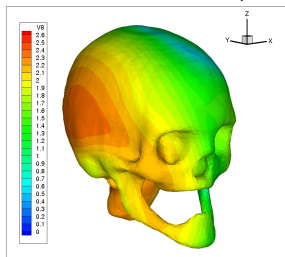
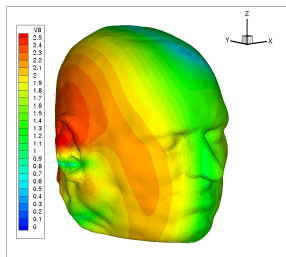




Modélisation numérique

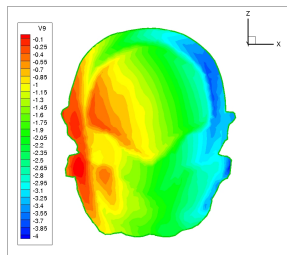


Méthode GDDT-IP₁

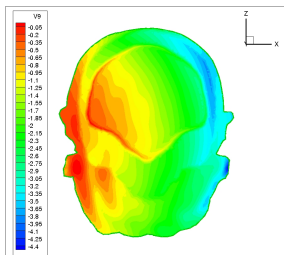


Méthode GDDT-IP₂

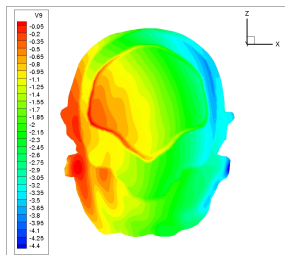
Modélisation numérique



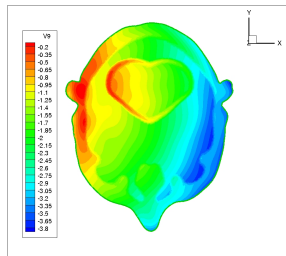
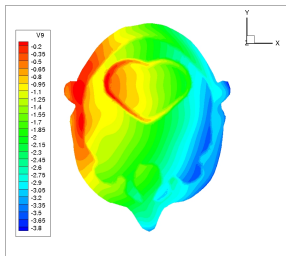
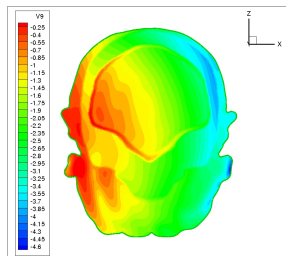
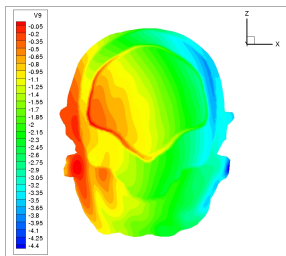
Méthode GDDT- \mathbb{P}_1



Méthode GDDT- \mathbb{P}_2



Méthode GDDT- \mathbb{P}_3



Maillage grossier, méthode GDDT- \mathbb{P}_3

Maillage fin, méthode GDDT- \mathbb{P}_1

- La modélisation et la simulation numérique sont de plus en plus utilisées pour étudier les problématiques d'exposition des personnes aux champs EM
 - Variations morphologiques avec l'âge
 - Diversité des sources de rayonnement
 - Influence sur le développement du fœtus
 - Prise en compte des incertitudes
- Mais aussi: applications dans le domaine médical
 - Thérapeutiques (hyperthermie externe par rayonnement micro-onde)
 - Diagnostiques (imagerie micro-onde)
 - Télémédecine (dispositifs - micro antennes - implantables pour le monitoring de pathologies au long cours)

Merci pour votre attention!

- La modélisation et la simulation numérique sont de plus en plus utilisées pour étudier les problématiques d'exposition des personnes aux champs EM
 - Variations morphologiques avec l'âge
 - Diversité des sources de rayonnement
 - Influence sur le développement du fœtus
 - Prise en compte des incertitudes
- Mais aussi: **applications dans le domaine médical**
 - Thérapeutiques (hyperthermie externe par rayonnement micro-onde)
 - Diagnostiques (imagerie micro-onde)
 - Télémédecine (dispositifs - micro antennes - implantables pour le monitoring de pathologies au long cours)

Merci pour votre attention!

- La modélisation et la simulation numérique sont de plus en plus utilisées pour étudier les problématiques d'exposition des personnes aux champs EM
 - Variations morphologiques avec l'âge
 - Diversité des sources de rayonnement
 - Influence sur le développement du fœtus
 - Prise en compte des incertitudes
- Mais aussi: **applications dans le domaine médical**
 - Thérapeutiques (hyperthermie externe par rayonnement micro-onde)
 - Diagnostiques (imagerie micro-onde)
 - Télémédecine (dispositifs - micro antennes - implantables pour le monitoring de pathologies au long cours)

Merci pour votre attention!