

Rencontres
scientifiques
de
l'Anses



Restitution du programme de recherche santé-radiofréquences

anses
agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Radiofréquences : de la mesure d'exposition à la recherche d'effets biologiques

25

septembre 2012

Maison Internationale
Cité internationale universitaire de Paris



Restitution du programme de recherche santé-radiofréquences



Métrologie et modélisation de l'exposition aux radiofréquences

François Gaudaire

Pourquoi caractériser l'exposition aux radiofréquences ?

- Indispensable pour les études sur les effets biologiques des radiofréquences
 - Dosimétrie : Mise au point de systèmes d'exposition
 - Maitrise des conditions d'exposition
- Vérification de la conformité à une réglementation (valeurs limites d'exposition)**
- Connaissance de l'exposition des personnes :**
 - **Données dans le cadre d'études épidémiologiques**
 - **Analyse et Gestion de risques**
 - **Concertation, information**

Contexte et rappels physiques

Le respect de la réglementation

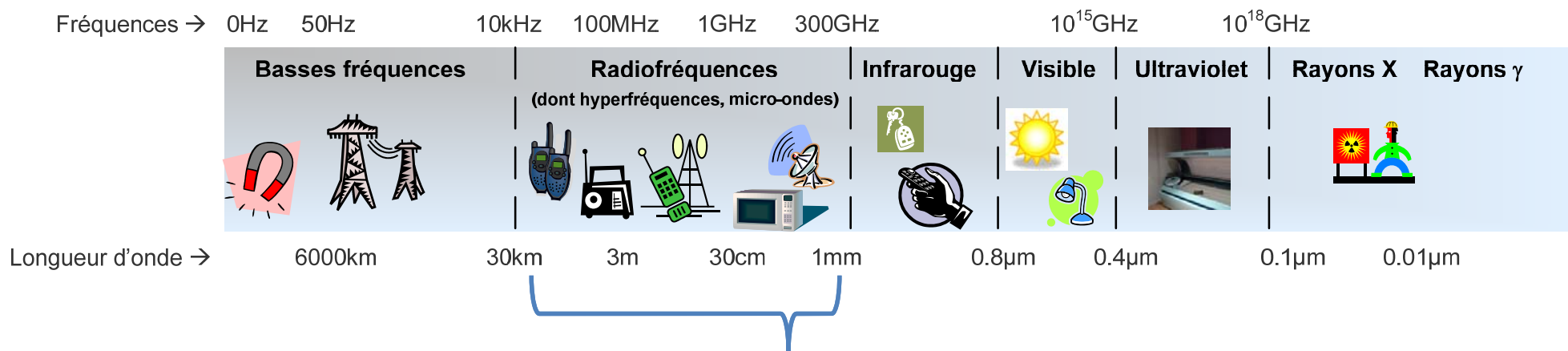
La caractérisation de l'exposition des personnes

Conclusions et perspectives

Les radiofréquences

Champs électromagnétiques :

- Signal émis lié à un service / une application
- Perturbation / pollution



Bande de fréquences d'émission : ~100 kHz à ~10 GHz

Les champs électromagnétiques se propagent en une onde électromagnétique

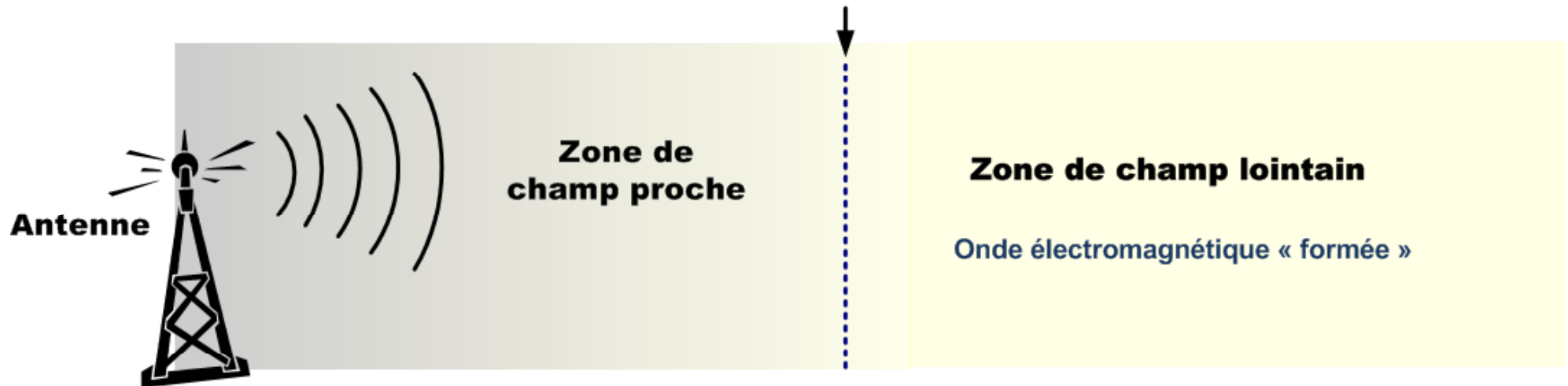
Exposition du public → un personne dans tout lieu accessible au public

≠ Exposition professionnelle qui concerne des configurations spécifiques

Physique de la propagation des ondes :

Deux zones distinctes en fonction de la proximité de l'émetteur

*Distance qui dépend de la fréquence
d'émission et de la dimension de l'antenne*



Mesures et modélisations numériques complexes

Onde électromagnétique « formée »

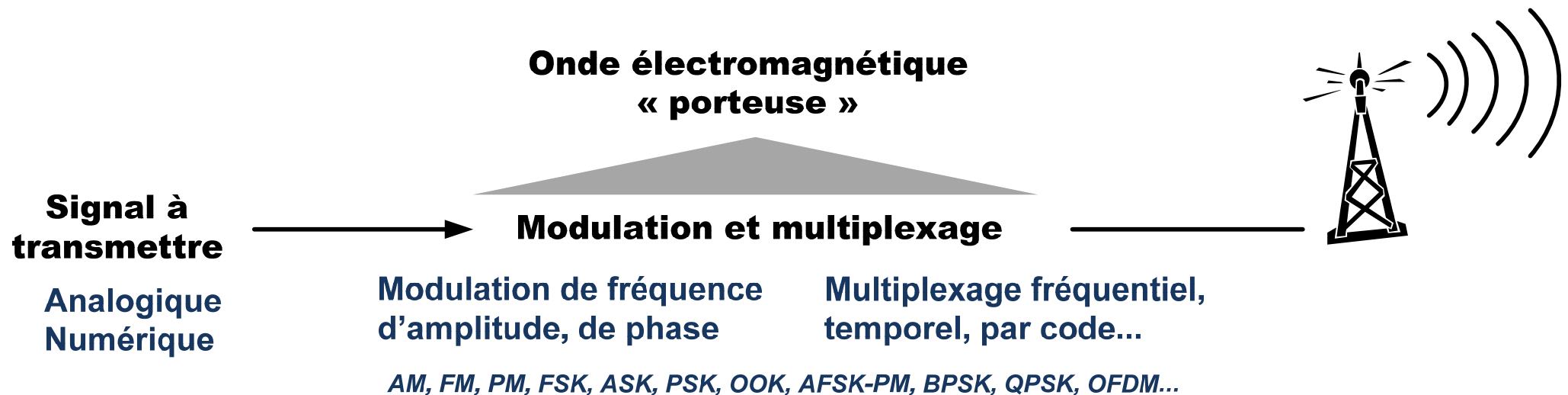
Caractérisation de l'énergie absorbée par les tissus
Débit d'absorption spécifique (DAS) en watt par kilo

Niveau de champ électrique en volt par mètre

Emetteur en contact ou à proximité de la personne

Exposition ambiante des personnes

Des signaux émis de plus en plus complexes



Exemples

Radiodiffusion « bande FM »

Voix

Modulation de fréquence
Puissance d'émission constante

Porteuse : entre 87,8 à 108 MHz

Téléphonie mobile GSM

Voix, SMS

Multiplexage FDMA + TDMA
Modulation GSMK
Puissance d'émission fonction du trafic
+ Contrôle de puissance

GSM 900 : autour de 900 MHz
GSM 1800 : autour de 1800 MHz

Réseau Wi-fi

Données

Modulation OFDM
Puissance d'émission fonction des données

Autour de 2,4 GHz et 5 GHz

Téléphonie mobile UMTS

Voix, données

Etalement de spectre (W-CDMA)
Modulation QPSK, 16QAM
Puissance d'émission fonction du trafic
+ Contrôle de puissance

Autour de 2,1 GHz

→ **Adaptation des méthodes de caractérisation de l'exposition à chaque nouveau service / signal**



Restitution du programme de recherche santé-radiofréquences



Contexte et rappels physiques

Le respect de la réglementation

La caractérisation de l'exposition des personnes

Conclusions et perspectives

Vérification du respect des valeurs limites d'exposition (ICNIRP)

- Décret français n°2002-775 du 3 mai 2002 (RE 1999/519/CE du 12 juillet 1999)
- [Directive travailleurs 2004/40/CE]

Valeurs limites d'exposition pour les radiofréquences

- Restrictions de base :
Mesure du **DAS** dans les tissus ou densité de courant
- Niveaux de référence :
Niveaux de champs électrique (E) ou magnétique (H) ambiant

VLE	
DAS local (10 g) :	2 W/kg
DAS corps entier :	0,08 W/kg
100 MHz (FM) :	E = 28 V/m
900 MHz (GSM 900) :	E = 41 V/m
2,4 GHz (Wi-fi) :	E = 61 V/m
...	

Le respect des niveaux de référence assure le respect des restrictions de base

Configuration d'exposition en « champ proche »

Lorsqu'un émetteur en radiofréquences est placé au contact ou à proximité d'une personne

Exemple : téléphone mobile, talkie walkie, carte Wi-fi dans un PC, clé 3G, LFC ...

- Estimation du DAS et/ou des densités de courant dans les tissus
- Vérification de la conformité avec les VLE

☐ Modélisation numérique

Exemple : FDTD, MoM...

Méthodes type éléments finis : résolution des équations de Maxwell

Adaptées à des petits volumes de calcul

Modèle numérique de personne

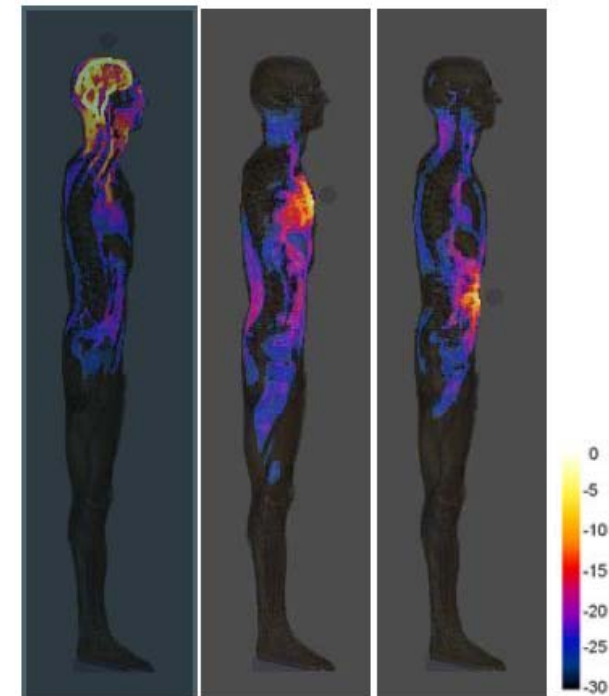
Données d'entrée : caractéristiques électromagnétiques des tissus (ϵ , σ)

☐ Métrologie

Mesure de densité de courant et estimation du DAS (à partir de E ou T°)

Surface ou volume équivalent représentatif des tissus humains

Données d'entrée : caractéristiques électromagnétiques des tissus (ϵ , σ)



Dans tous les cas : approche conservative / maximisation des paramètres utilisés

Exemple 1 : banc de mesure de DAS des téléphones mobiles

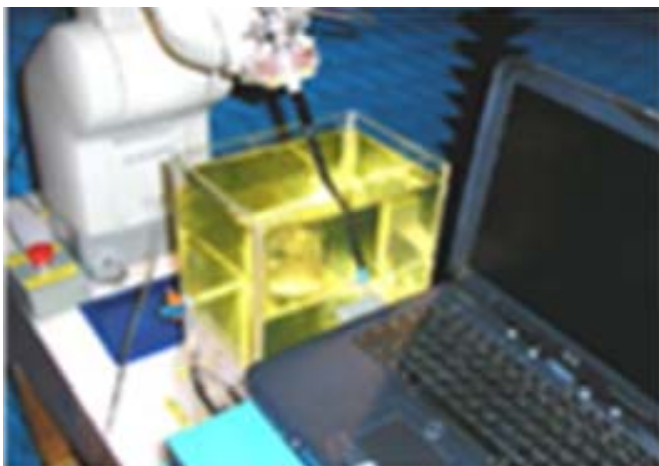
DAS < 2 watts par kilo ?

- Utilisation d'un fantôme rempli d'un liquide équivalent aux tissus humain
- La sonde de mesure est plongée dans le liquide
- La forme du fantôme est adaptée à la configuration d'utilisation : tête, cuve rectangulaire...

Approche conservative : estimation du **DAS maximum** (conditions de pire cas)



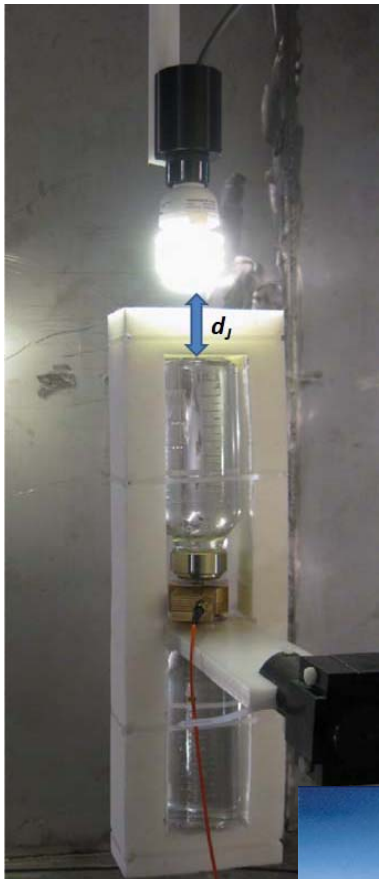
Des méthodes qui doivent évoluer en fonction des usages et des technologies



Normes EN 62209-1, EN 62209-2



Exemple 2 : mesures des densités de courant liées à l'émission du ballast d'une lampe fluo compacte



Utilisation d'une sphère métallique
représentative d'une tête

Utilisation d'une sonde de mesure
de courant placée au milieu d'une solution saline

Mesure du courant circulant sur la sphère / dans la solution

Discussions sur la pertinence et représentativité des méthodes

Au-delà de la vérification de conformité, quel est le lien avec l'exposition réelle ?



Pas de normes ...



Configuration d'exposition en « champ lointain »

Configuration générale de l'exposition du public aux émetteurs fixes et mobiles dans l'environnement

Exemple : pylônes radio et télévision, stations de base de téléphonie mobile, bornes d'accès Wi-fi...

- Estimation du niveau de champ électrique
- Vérification de la conformité avec les VLE

Depuis 2001 : protocole de mesure de l'Agence Nationale des Fréquences

Mesure des niveaux de champ électrique par service
Comparaison avec les VLE

Approche conservative : Prise en compte du trafic maximum en téléphonie mobile
 Mode « Maxhold »

Des versions successives pour suivre les évolutions technologiques (v1, v2, v3...)

Archivage et visualisation des résultats sur le site « cartoradio »

Synthèses et analyses annuelles

Protocole de mesure ANFR

Version v3

Pour un lieu donné :

- Recherche du point de niveau cumulé maximum
- Mesure du niveau de champ électrique « global »
Cumul sur l'ensemble des fréquences
- Analyse spectrale détaillée pour chaque service
Mesure adapté au signal (largeur de bande, modulation...)
Extrapolation au trafic maximum
- Affichage des incertitudes de mesure



Bande de fréquences	Services
100 kHz – 30 MHz	Services HF (y compris la radiodiffusion sonore)
30 MHz – 87,5 MHz (hors TV)	PMR
87,5 MHz – 108 MHz, 174 MHz – 223 MHz	Radiodiffusion sonore (FM – RNT)
108 MHz – 880 MHz (hors TV et RNT)	PMR – BALISES
47 MHz – 68 MHz, 470 MHz – 830 MHz	TV ⁵
790 MHz – 862 MHz	Dividende numérique ⁶
921 MHz – 960 MHz	GSM 900 et UMTS 900 (925 – 960 MHz) – GSM R (921 – 925 MHz)
960 MHz – 1710 MHz	RADARS - BALISES – FH
1805 MHz – 1880 MHz	GSM 1800
1880 – 1900 MHz	DECT
2100 – 2170 MHz	UMTS 2100
2200 – 6000 MHz (hors WiFi)	RADARS – BLR (Wimax) - LTE – FH
2400 – 2483,5 MHz, 5150 – 5350 MHz, 5470 – 5725 MHz	Réseaux locaux radioélectriques (WiFi)



Lieu : LYON 04 (69)

Référence du point de mesure : 23 247

Date de la mesure : 23/05/2011

Situation et caractéristiques du point de mesure

Localisation précise du point de mesure

N° : 7 Rue : Henri Chevalier

Place/Autre :

Code postal : 69004

Ville : LYON 04

Caractéristiques du point de mesure

Intérieur

Type d'environnement : Appartement / Pavillon / Bureau

Latitude : 45° 46' 57" N

Longitude : 4° 49' 43" E

Emetteurs visibles

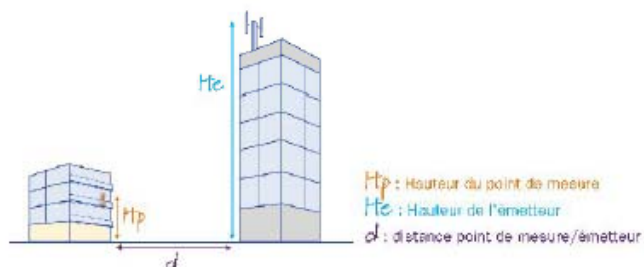


Schéma type : dans certains cas, Hp est supérieur ou égal à He

Emetteurs	Hp	He	d
GSM/UMTS OUTDOOR	15 m	30 m	70 m
PMR	15 m	40 m	190 m

Synthèse des résultats

Valeur limite respectée

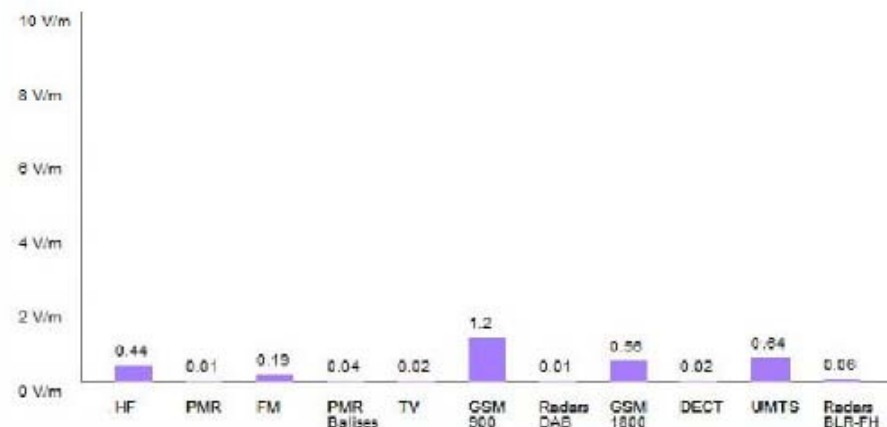
Par fréquence : Oui

Par l'ensemble des émetteurs : Oui

Le champ Electrique total du site E_{total} est

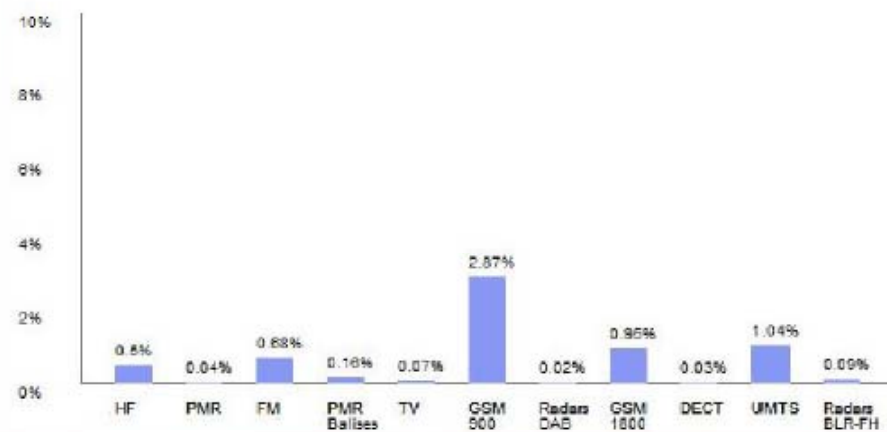
18,1 fois plus petit que la valeur limite la plus faible.

Champs électriques



Champs électriques relatifs

par rapport à la limite du décret pour chaque type de station



En résumé

Respect de la réglementation – Vérification de conformité

Caractériser le DAS ou de niveau de champ électrique

Soit par la mesure, soit par la modélisation numérique

Il faut adapter les méthodes aux nouvelles technologies et aux nouveaux usages

Nouveaux signaux de télécommunications (LTE / 4G par exemple) :

Modulation numérique complexes, étalement de spectre, saut de fréquence...

Configuration d'utilisation :

Téléphone, Smartphone, tablette...

Approche conservative, « pire cas »

→ Lien avec l'exposition réelle ?



Contexte et rappels physiques

Le respect de la réglementation

La caractérisation de l'exposition des personnes

Conclusions et perspectives

Configuration d'exposition en « champ proche »

Estimation du DAS ou des densités de courant « réels » auxquels sont exposés les personnes

- Modélisation numérique
- Métrologie

De nombreux travaux de recherche sur :

L'analyse et le choix de paramètres d'entrée représentatifs d'une exposition réelle

*Exemple : Puissance moyenne d'un téléphone mobile GSM ou UMTS / puissance maximale
Puissance d'émission d'un émetteur type clé 3G en fonction des débits d'utilisation*

Analyse statistique (valeur moyenne, écart type) sur ces paramètres

Estimation des incertitudes liés à l'ensemble de ces méthodes

Nouveaux usages, configurations d'exposition...

Exemple : Temps d'utilisation d'un téléphone mobile ou liaison Wi-fi



Configuration d'exposition en « champ proche » - Exemple de projets en cours



Projet ANR [2009-2012]
Création de modèle numérique d'enfant
Calcul de DAS
Comparaison exposition enfant / adulte



Orange labs
Telecom ParisTech
Telecom Bretagne
IGR
Phimeca
INRIA
PRES MLV
UPMC



Projet ANR & JST [2009-2012]
Création de modèle numérique
Analyse de l'exposition du fœtus



Orange
Telecom ParisTech
Telecom Bretagne
Phimeca
NICT
CHIBA
NITECH
KCMC

Configuration d'exposition en « champ lointain »

Caractérisation des niveaux de champ électrique ambiant

- Modélisation numérique
- Métrologie

Beaucoup de résultats sont disponibles :

- ✓ Mesures dans le cadre d'études épidémiologiques (publications)
- ✓ Mesures de laboratoires avec des protocoles différents de celui de l'ANFR
- ✓ Niveaux simulés fournis aux villes (dossier lieux sensibles)
- ✓ Mesures s'associations, villes, particuliers...

Liés à des méthodes de calcul, protocoles, paramètres, équipements différents

Supports de résultats différents (moyennage, bande de fréquences, ...)

→ l'analyse de ces données et leur comparaison n'est pas simple !

Configuration d'exposition en « champ lointain » : métrologie

Sélectivité en fréquences ?

Niveau de champ électrique cumulé sur la bande de fréquences de mesure

Utilisation d'une sonde isotropique large bande

Paramètres associés : largeur de bande d'analyse, sensibilité, type de moyennage,...

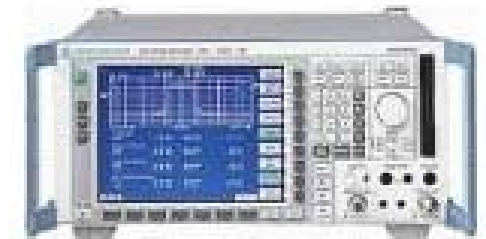


Niveau de champ par services (bandes de fréquences)

Dosimètre ou exposimètre sélectif, sonde fixe

Un niveau de champ électrique donné pour un service (radio FM, GSM...)

Paramètres associés : bandes de fréquences, réglage des filtres utilisés,...



Analyse spectrale complète

Analyseur de spectre et antennes calibrées

Des mesures complexes adaptées au signal

Pertinence des paramètres d'analyse et de mesure :

filtres RBW, VBW, grandeur mesurée (moyenne spectrale, maxhold, channel power,...)



Configuration d'exposition en « champ lointain » : métrologie

Lieu de mesure

- En un point fixe
- Moyennées sur plusieurs points
- Balayage spatial d'une zone
- Appareil porté par une personne

Prise en compte des variations temporelles

- Mesure instantanée
- Moyennage temporelle sur une certaine durée
6 minutes « ICNIRP », fonction de la forme temporelle du signal
- Valeur moyenne / rms / maximale,
- Mesure sur une longue durée : jour, semaine

Connaissance des incertitudes

Post traitement des résultats de mesure

- Calcul du niveau cumulé sur toutes les fréquences :
Somme quadratique (ICNIRP), niveaux éq. 900
- Prise en compte du trafic (ex. : charte ville de Paris)



Beaucoup de paramètres pour analyser un résultat de mesure

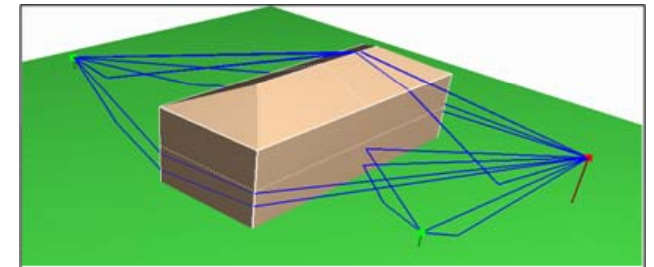
Difficulté pour la comparaison de comparer de différents résultats

Configuration d'exposition en « champ lointain » : modélisation numérique

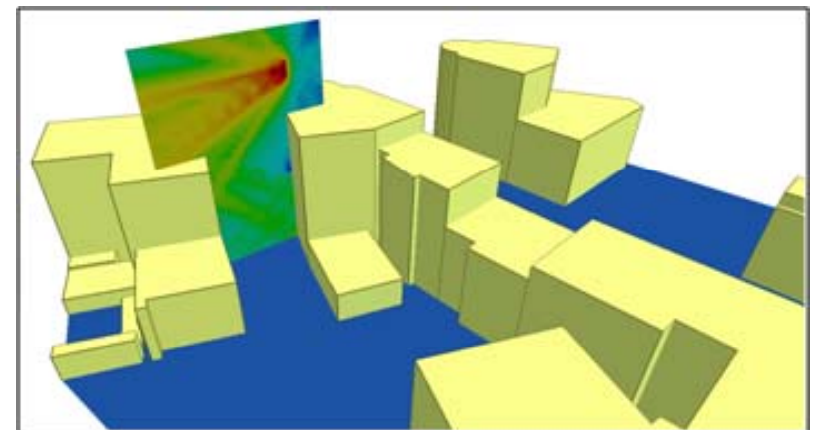
En zone de champ lointain + domaine des radiofréquences :

Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques par des méthode asymptotiques et/ou modèles semi-statistiques

- Principe de l'optique géométrique avec la propagation de rayons
- A l'intérieur des bâtiments ou à l'extérieur (milieu urbain)
- Interaction de l'onde avec les obstacles :
Réflexion, diffraction, ondes rampantes, diffusion...



- Données d'entrée pertinentes : modèle de terrain, bâti, position et caractéristiques des émetteurs
- Connaissance des incertitudes liées à ces données
- Des paramètres de calcul liés aux méthodes utilisées
- Support de calcul :
Point, surface ou volume de réception, moyennage



Configuration d'exposition en « champ lointain »

Exemple de projets en cours :

Etudes techniques menées dans le cadre du Comop « Expérimentation »

Modélisations et mesures de l'exposition et de la couverture des réseaux sur 16 communes pilotes

Uniquement les stations de base de téléphonie mobile

Partie exposition (CSTB, Inéris)

Couverture et qualité de service (ATDI, GET)

- Etats de lieux de l'existant
- Expérimentation de diminution de puissance des émetteurs

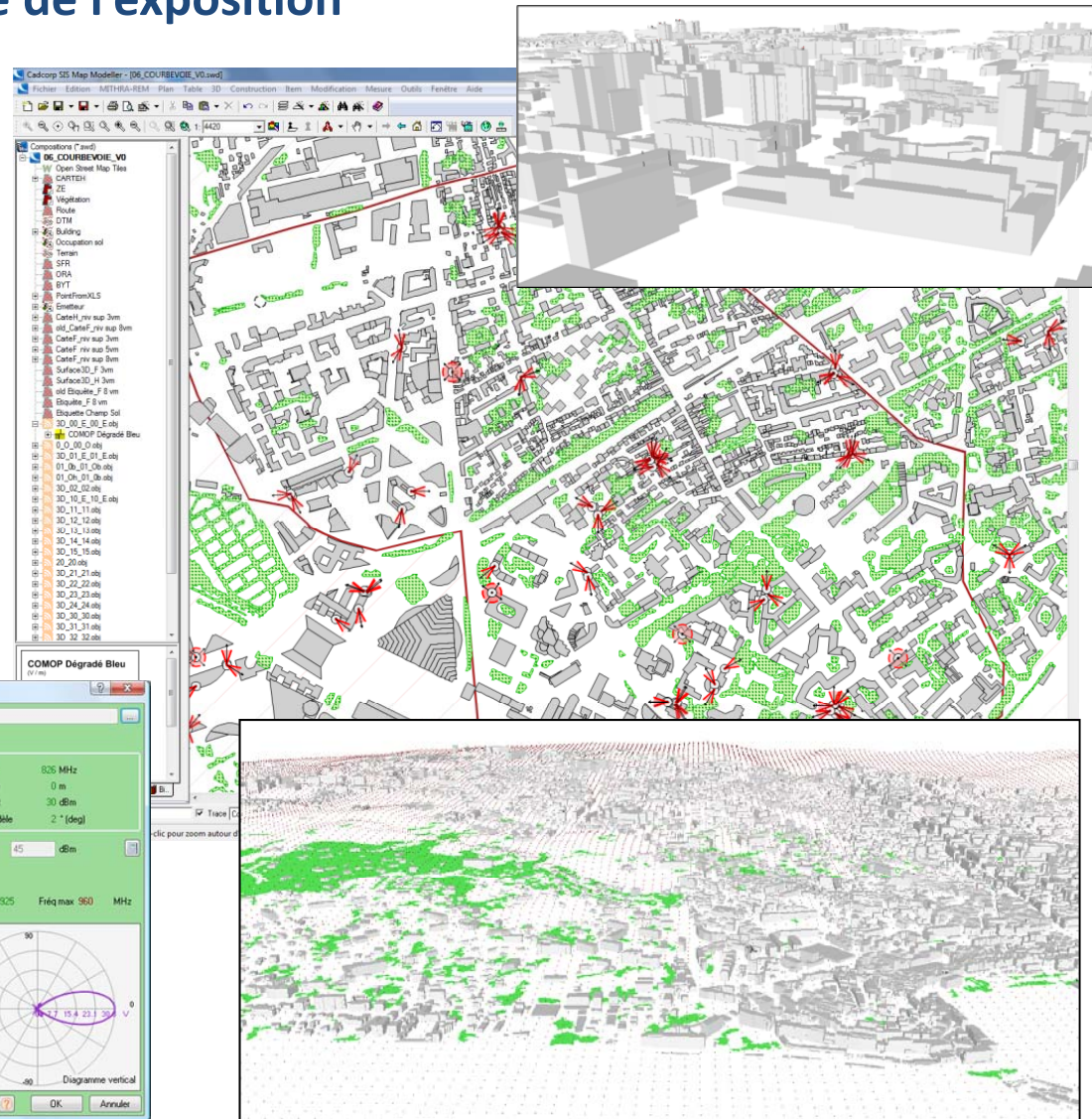
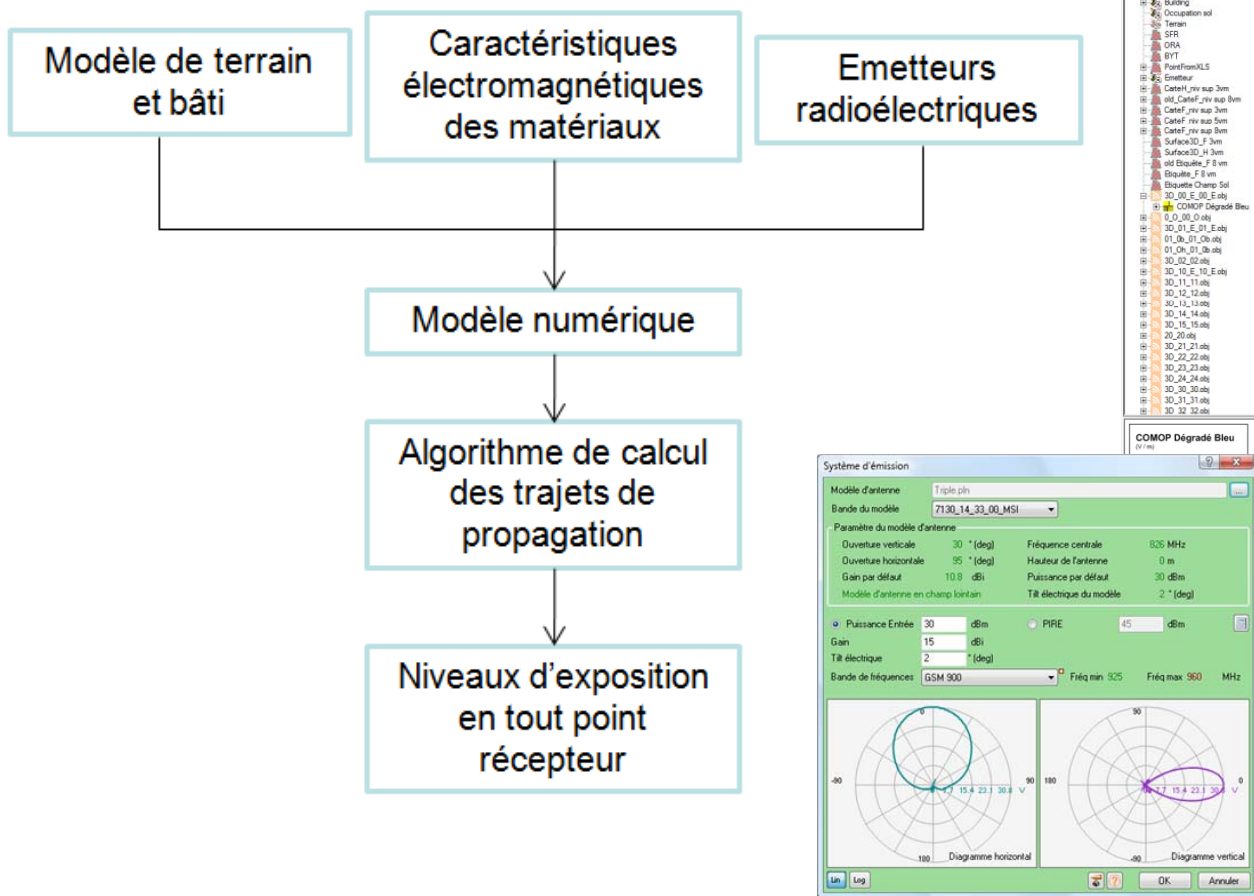
ANFR – DGPR

ATDI CSTB GET Inéris

+ opérateurs, associations, CETE, Arcep...

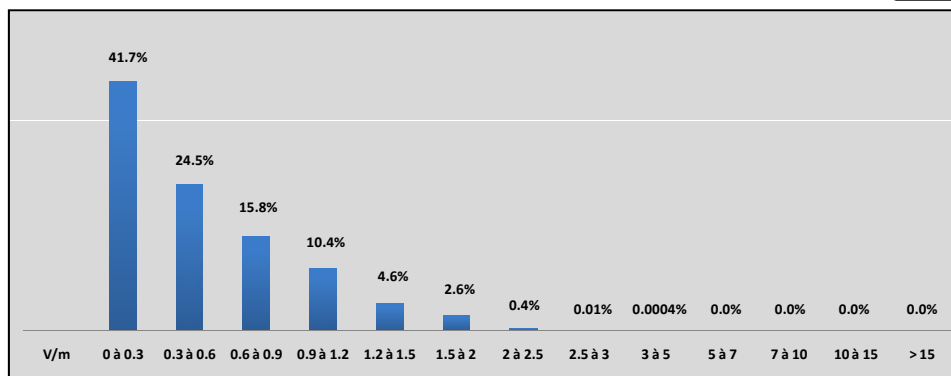
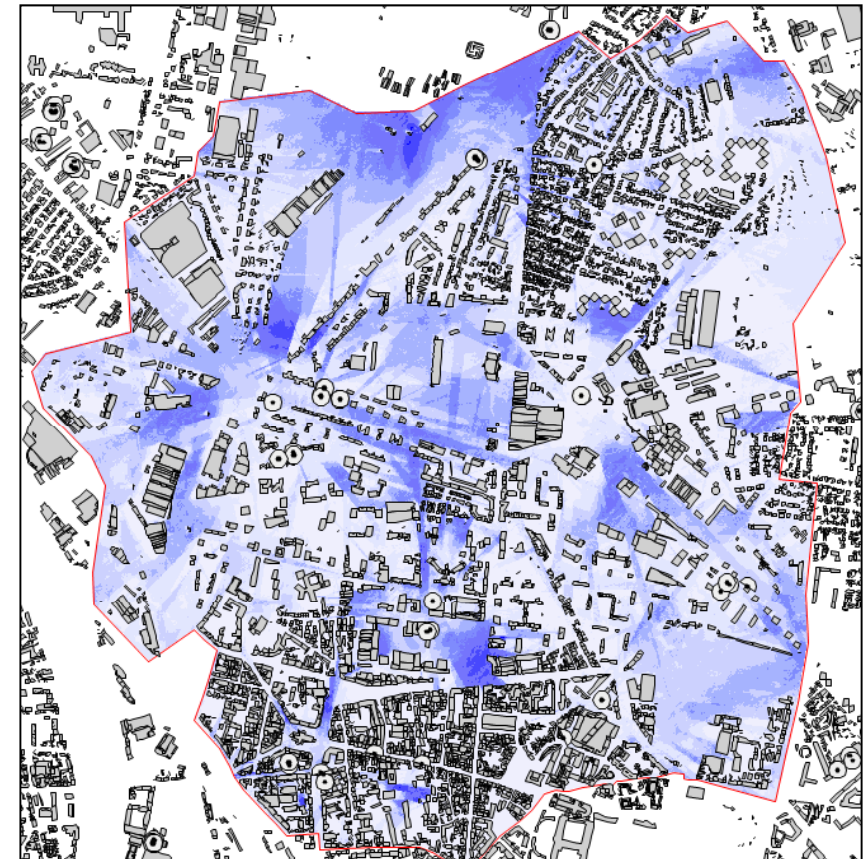
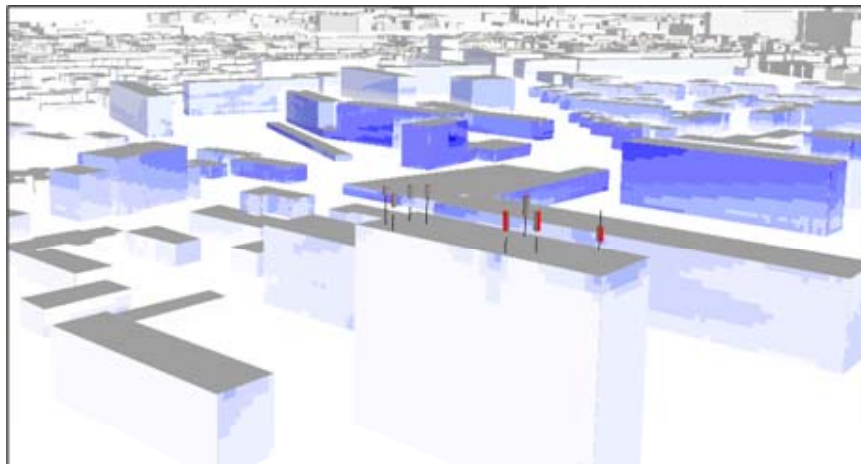
COMOP - Modélisation numérique de l'exposition

Logiciel MITHRA-REM (CSTB / Geomod)



COMOP - Modélisation numérique de l'exposition

- Niveaux d'exposition au dessus du sol et en façade des bâtiments
- Identification des zones les plus exposées et points atypiques
- Analyse statistique : répartition des niveaux d'exposition



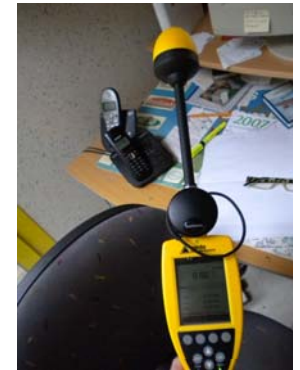
COMOP - Mesure de l'exposition

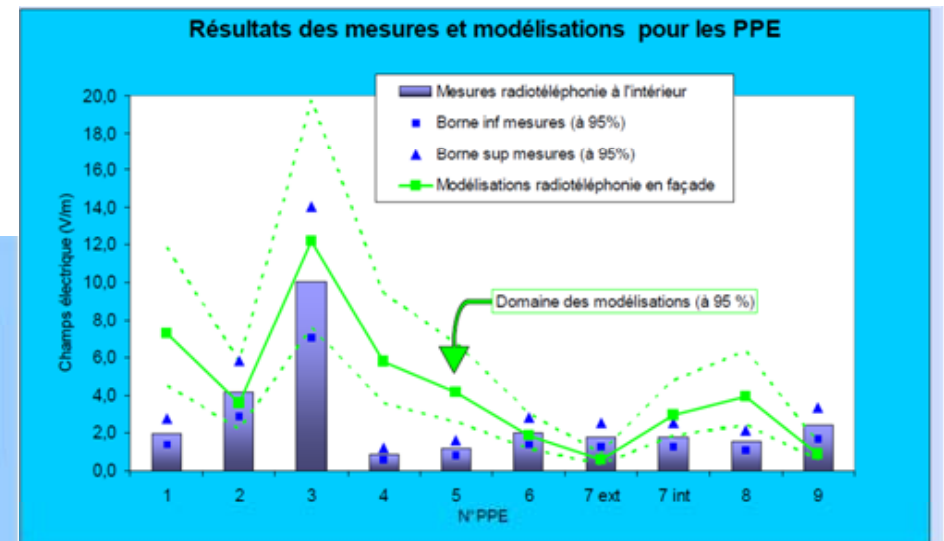
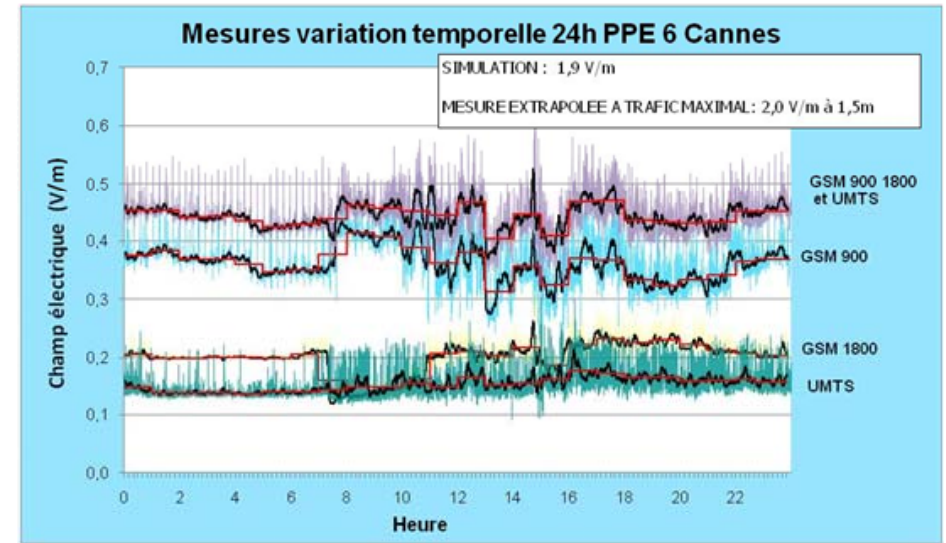
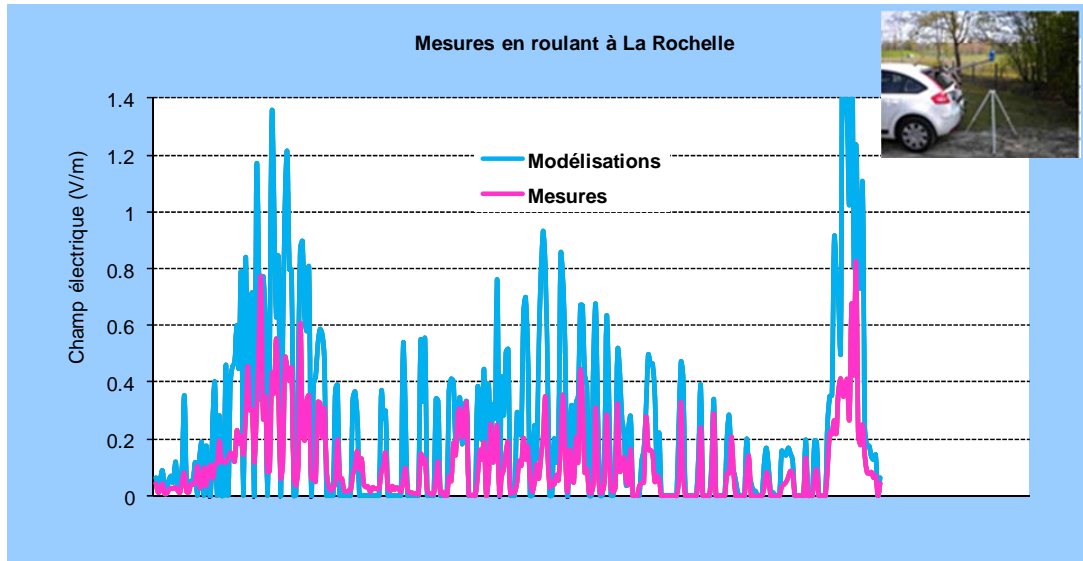
Les campagnes de mesure réalisées

- Mesures spectrales aux points les plus exposés identifiés par la modélisation numérique
- Mesures embarquées géo référencées dans les rues de la zone d'expérimentation
- Mesures d'exposition individuelle
- Mesures de durée prolongée en des points fixes

Objectifs :

- Meilleure connaissance de l'exposition du public avec différentes méthodes de mesure
- Confronter la modélisation numérique et les résultats de mesures
- Se rapprocher de l'exposition des personnes (indoor, durée d'exposition)







Restitution du programme de recherche santé-radiofréquences



Etude d'envergure toujours en cours...

Lien entre architecture des réseaux / couverture / qualité de service et niveaux d'exposition

Grande quantité de données collectées sur l'exposition du public :

- Différentes campagnes de mesures
- Modélisations numériques à grande échelle

Phase importante d'analyse des résultats (... et au-delà du projet)

Complémentarité entre les différentes mesures entre elles

Bonne concordance et complémentarité entre mesures et modélisation

Mais :

- Etude limitée aux émetteurs de stations de base de téléphonie mobile
- Beaucoup de débats dus au manque de consensus sur la définition de « l'exposition »
Indoor / outdoor, public / personne, support spatial...



Contexte et rappels physiques

Le respect de la réglementation

La caractérisation de l'exposition des personnes

Conclusions et perspectives

Configuration d'exposition : champ proche | en champ lointain

Grandeurs représentative : DAS | Niveau de champ électrique

Respect de la réglementation \neq Niveaux d'exposition réels

- Les différentes mesures possibles
- +
- Les outils de modélisation numérique



... participent conjointement à la
connaissance de l'exposition

Beaucoup de résultats disponibles

→ nécessitent une analyse critique pertinente

... délicat dans le débat actuel et le contexte médiatique

La R&D sur le sujet :

- Adaptation des méthodes aux nouveaux émetteurs et aux nouveaux usages
- Besoin de définition(s) consensuelle(s) de l'exposition :
Plusieurs indicateurs d'exposition pertinents à définir
une personne / public, maximum, moyenne...
Normalisation (*exemple : acoustique environnementale*)
- Caractérisation des incertitudes et prise en compte des ces incertitudes dans l'analyse



Restitution du programme de recherche santé-radiofréquences



Merci de votre attention

francois.gaudaire@cstb.fr