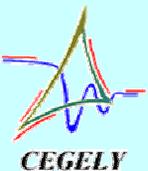
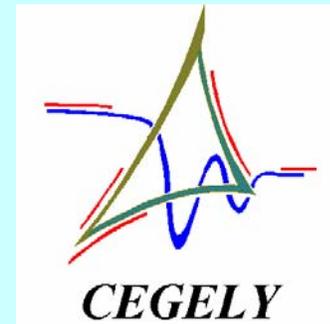


# Les courants induits par les champs électromagnétiques basses et moyennes fréquences

Noël BURAIIS



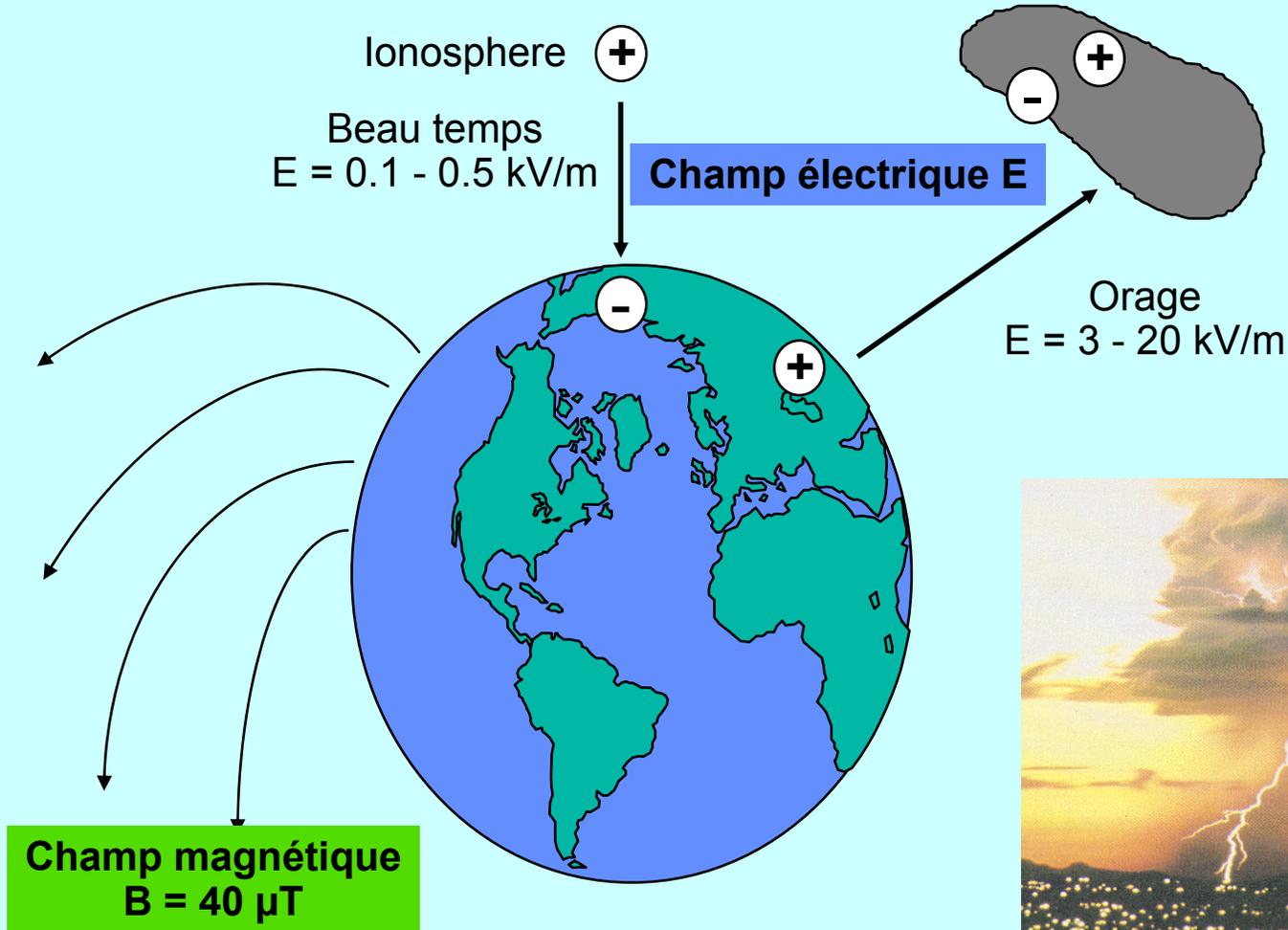
# Utilisation de l'électricité et Champs électromagnétiques

Champs  
alternatifs

- Production, transport et distribution de l'énergie électrique. ← **BF**
- Conversion de cette énergie en :
  - Energie électrique « modulée » (convertisseurs,..)
  - Energie mécanique (actionneurs,..)
  - Energie thermique,
  - .....← **BF, MF**
- Transmission d'information par voie hertzienne ← **HF**

# Et aussi les champs naturels !

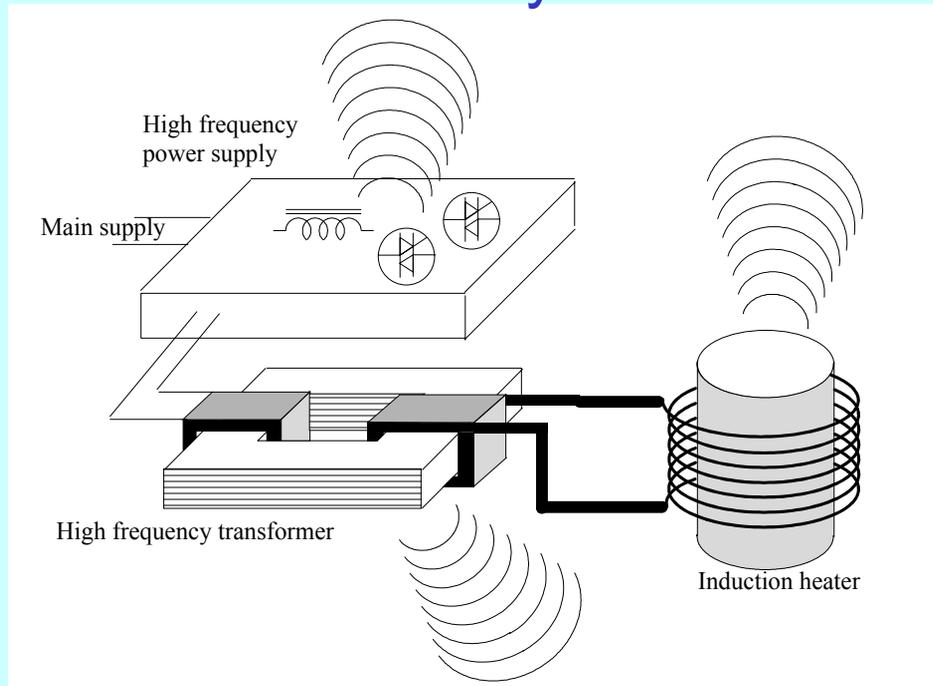
**Champs  
« statiques »**



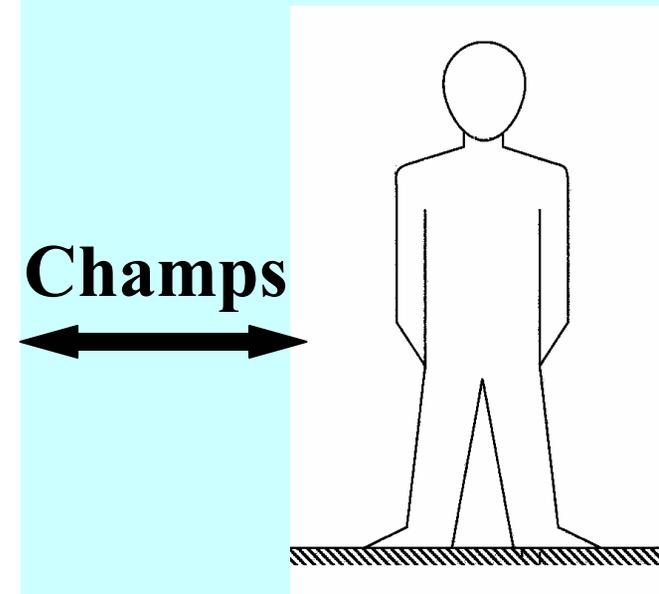
# Des interactions complexes

- 2 « systèmes » très différents :

## Le source rayonnante



## Le Corps humain



**Matériaux conducteurs ou isolants :**  
 $\sigma \geq 10^5 \text{ S/m}$   $\mu_r = 1, \dots, 50000$   $\epsilon_r < 10$

**« Matériaux » à forte teneur en eau  
(Dielectrique avec pertes)**  
 $\sigma < 2 \text{ S/m}$   $\mu_r = 1$   $\epsilon_r > 10^6$  en BF

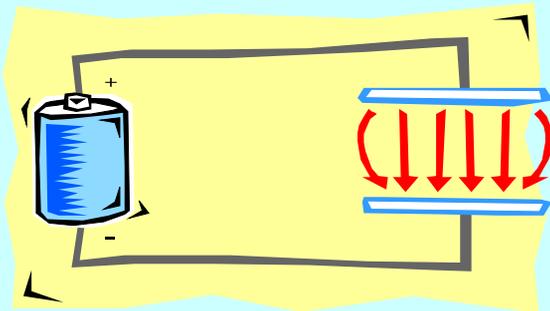
# Les champs électromagnétiques ?



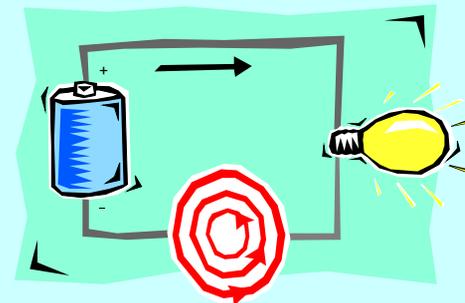
J.C. Maxwell  
1831-1879

- Des outils pour expliquer et quantifier des actions physiques (mécanique, thermique, ...).
- Equations de Maxwell = Phénomènes complexes.
- En Basses Fréquences → Séparation des effets du Champ électrique  $E$  et du Champ magnétique  $H$ .

**Tension  $V \rightarrow E$**

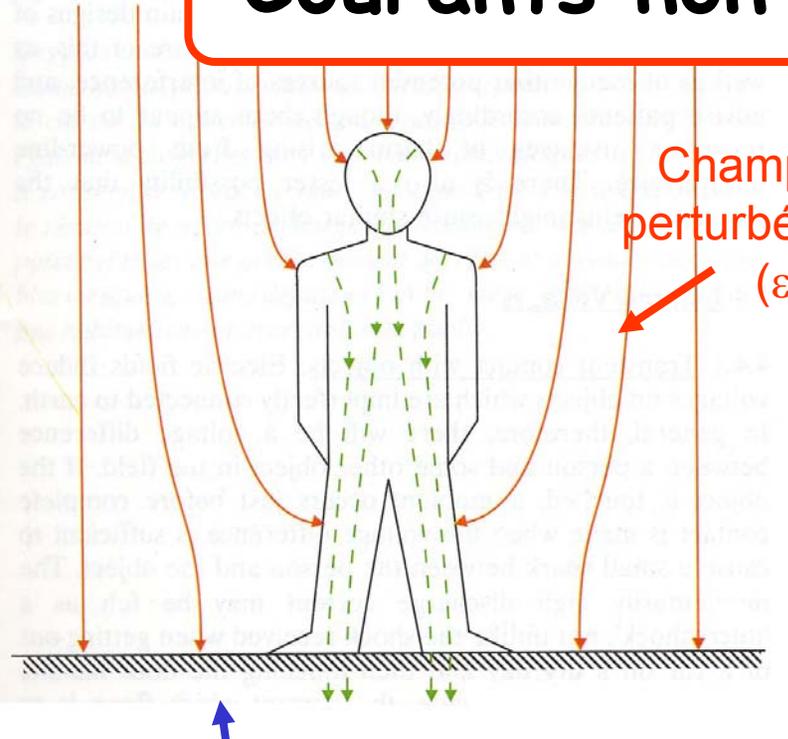


**Courant  $I \rightarrow H$**



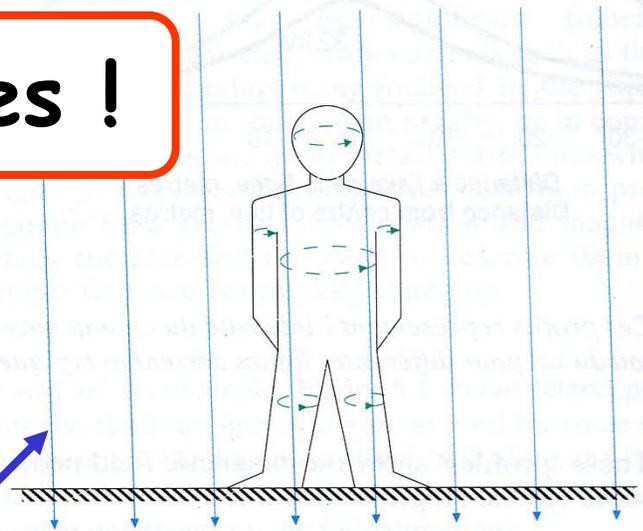
# Courants induits dans le corps humain par les champs BF

**Courants non mesurables !**



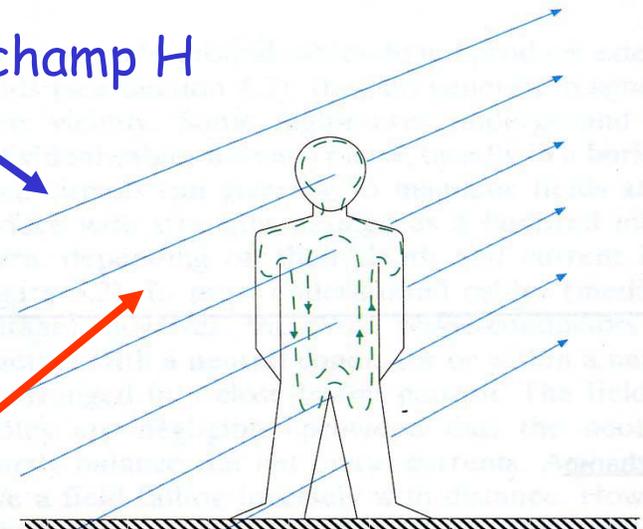
Champ source E  
perturbé par le corps  
( $\epsilon_r \gg 1$ )

Influence du champ E



Influence du champ H

Champ source H  
non perturbé  
( $\mu_r = 1$ )



# Ne pas confondre

- Courants induits sans contact par E ou H. 
- Courants de contact corps-objet dus à des potentiels différents (corps ou objet chargé électriquement par un champ électromagnétique).
- Electrification (ou accident électrique).
- Activité électrique naturel du corps humain (EEG, MEG).

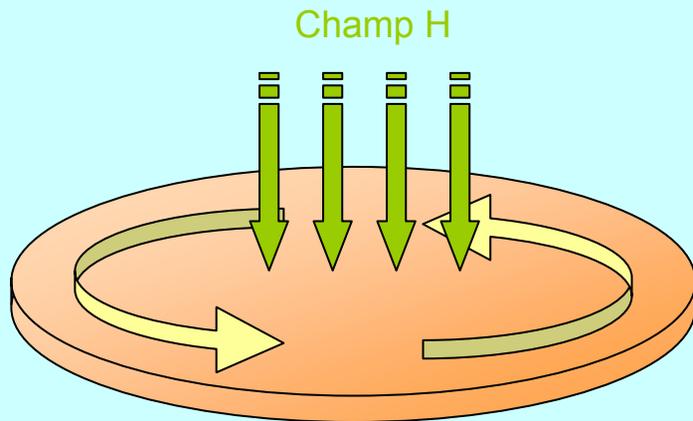
# Répartition et amplitude des courants induits en BF

- Paramètres de la source :
  - Fréquence,
  - Tension (ddp), et/ou Courant (N.I = ampère-tour),
  - Structure (système + écrans) et dimensions.
- Paramètres du corps humain :
  - Structure (organes) et dimensions,
  - Conductivité électrique  $\sigma(f)$  et permittivité diélectrique  $\epsilon_r(f)$ ,
  - ....., paramètres physiologiques !
- Distance source-corps humain.

# Estimation de l'amplitude des courants induits

- Densité de courant :  $J = I/S$
- Relations  $J(E)$  et  $J(H)$  analytiques simples ou issues d'expérimentations :
  - Champ  $H$  en BF :  $J = \mu_0 \cdot \sigma \cdot \pi \cdot r \cdot f \cdot H$
  - Champ  $E$  en BF :  $J = k \cdot f \cdot E$
- Utilisées pour le calcul des Niveaux de Référence.
- Exemple pour  $f = 50 \text{ Hz}$ 
  - $B_{\max} = 100 \text{ } \mu\text{T}$ ,  $E_{\max} = 5 \text{ kV/m}$  pour  $J_{\max} = 2 \text{ mA/m}^2$  (domestique)
  - $B_{\max} = 500 \text{ } \mu\text{T}$ ,  $E_{\max} = 10 \text{ kV/m}$  pour  $J_{\max} = 10 \text{ mA/m}^2$  (Professionnel)

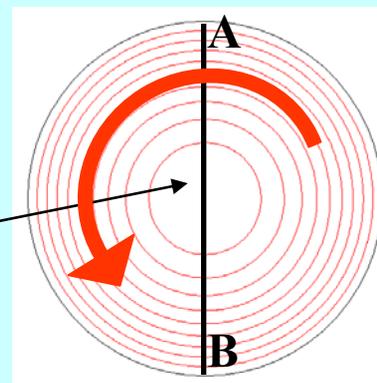
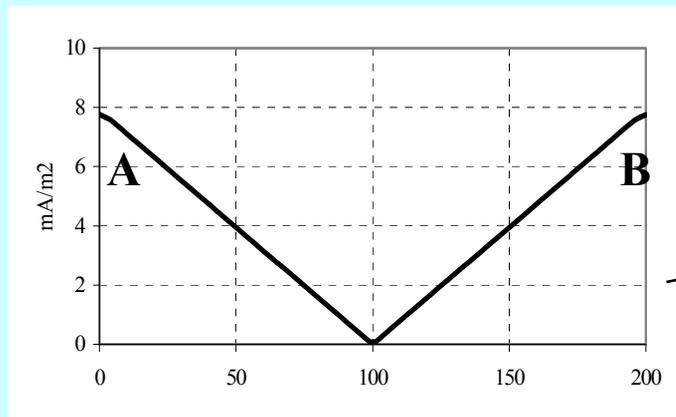
# Exemple : Relation $J(H)$ pour $H = cte$



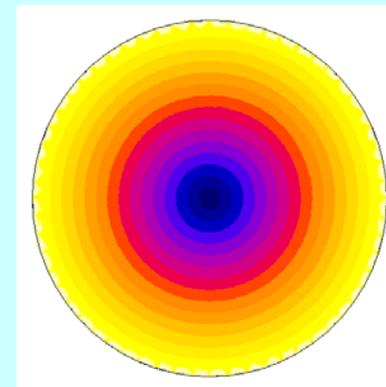
Loi de Faraday



$$J_r = \mu_0 \cdot \sigma \cdot \pi \cdot r \cdot f \cdot H$$



Lignes de courant



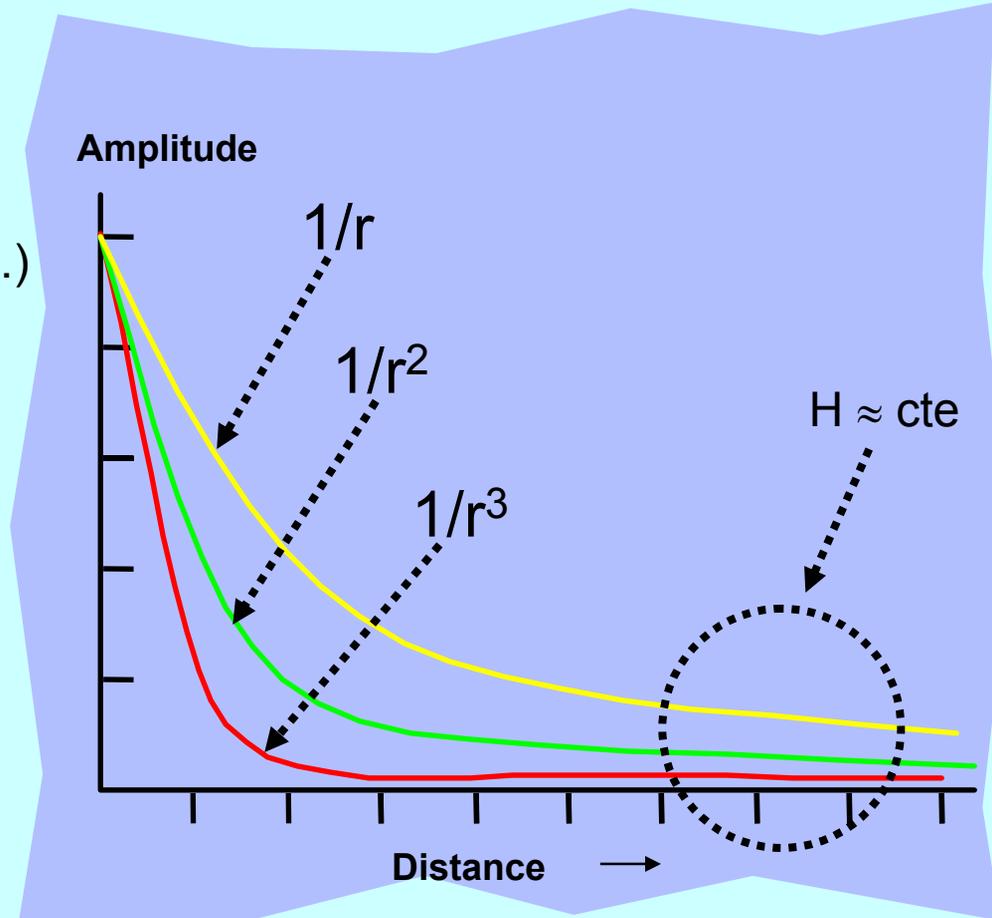
distribution de J

# Variations du champ magnétique H avec la distance à la source

$1/r$  : Systèmes à 1 fil  
(lignes d'alimentation de trains,...)

$1/r^2$  : Systèmes multifils  
aller-retour :  
(alimentations domestiques)

$1/r^3$  : Systèmes  
électrotechniques  
(bobines,...)



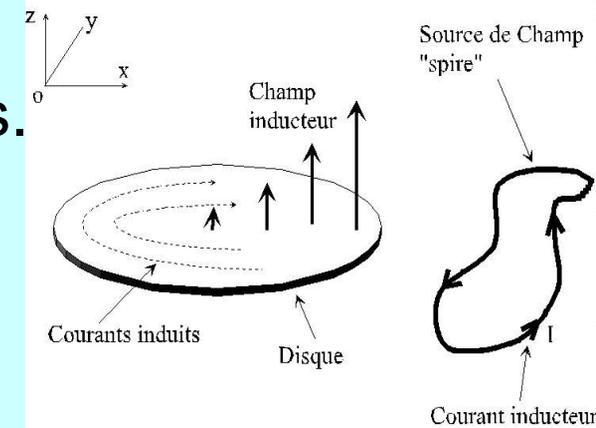
$H \approx \text{constante}$  loin de la source, c.a.d pour des champs faibles.

# Influence de la variation de H avec la distance

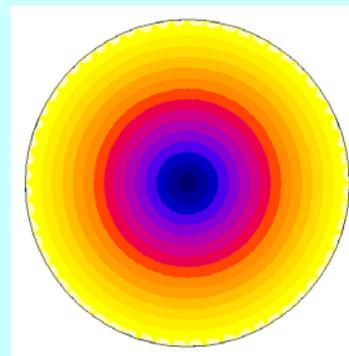
- Modélisation numérique des phénomènes.
- Simulation 2D dans le « disque » humain
- Courant induits :

- Homogène  $J = 7.48 \mu\text{A}/\text{m}^2$
- 1 fil  $J = 1.71 \mu\text{A}/\text{m}^2$
- 2 fils +-  $J = 0.53 \mu\text{A}/\text{m}^2$

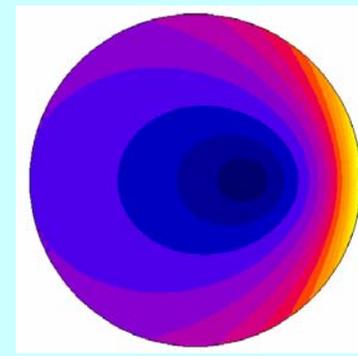
← pour  $H = 1 \text{ A/m}$  sur le bord du disque



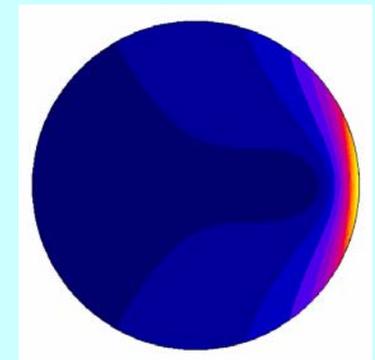
- Résultat :
  - Facteur 15 sur J



Homogène



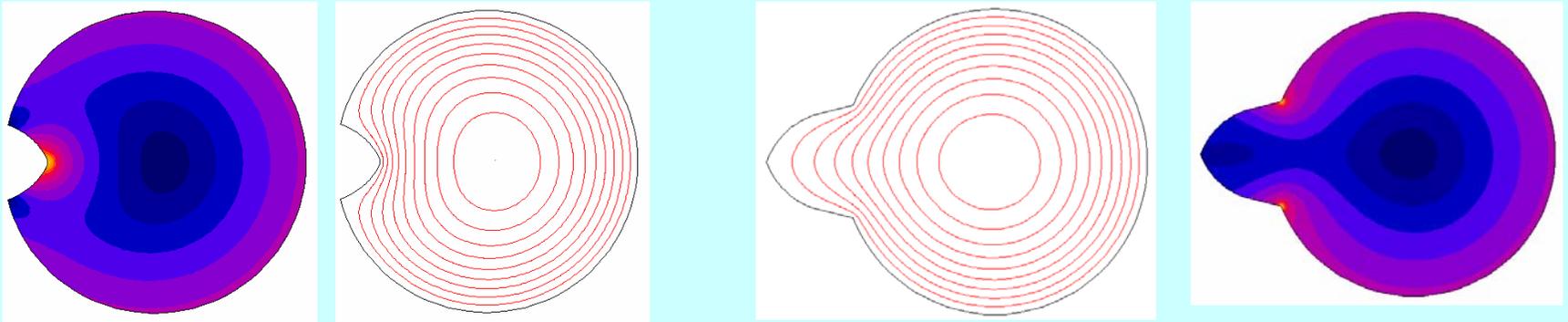
1 fil



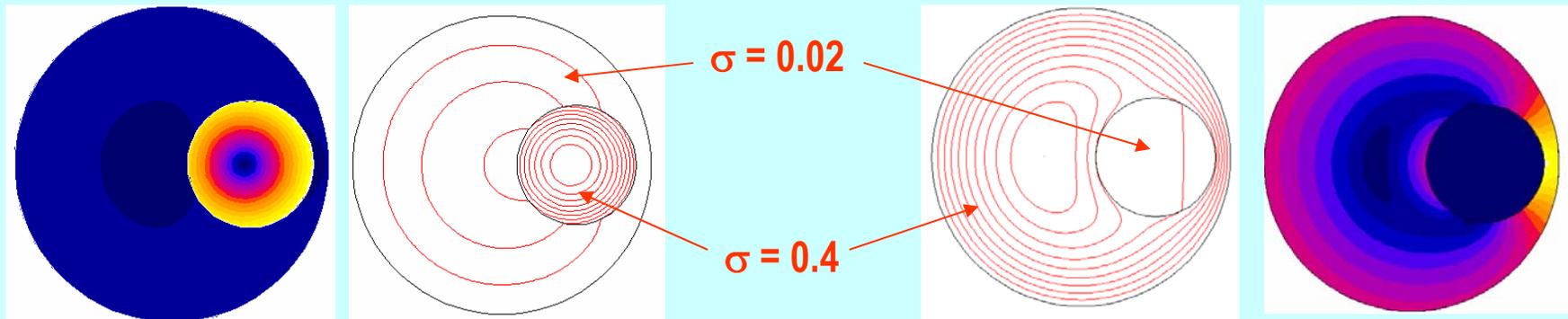
2 fils +-

# Influence des formes et des conductivités des organes

- Illustration par simulation 2D et H uniforme.
- Influence de la forme :

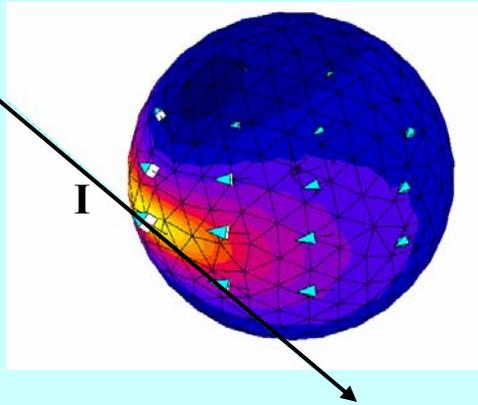


- Influence de la conductivité :

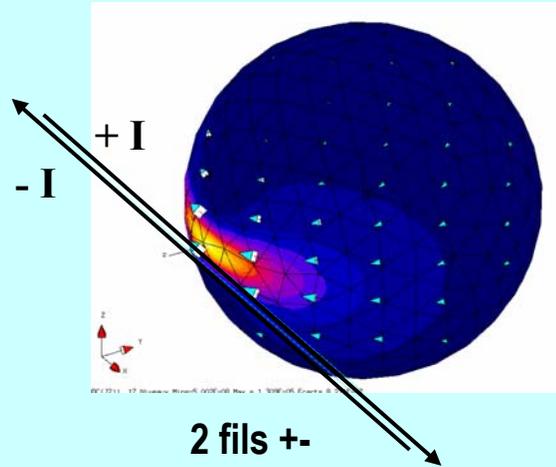


# Influence du type de source de champ H

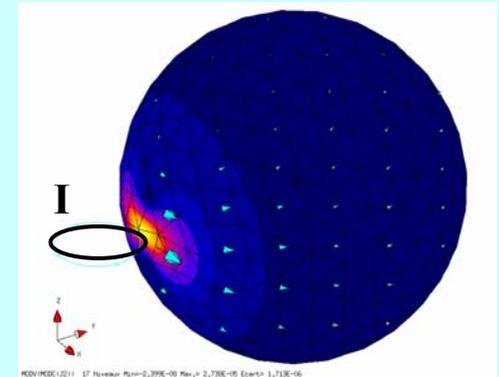
## Illustration en 3D\*



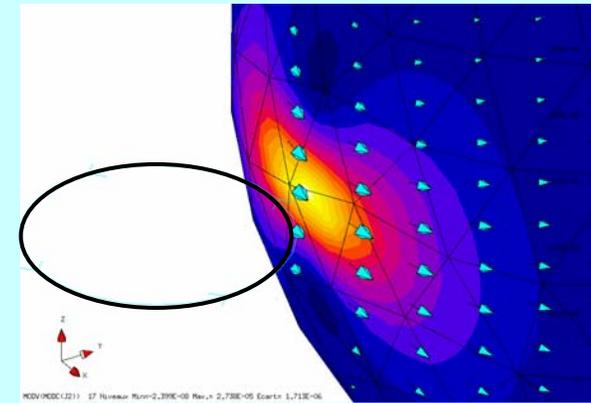
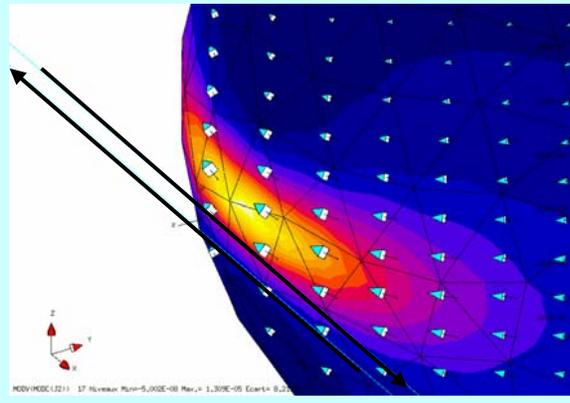
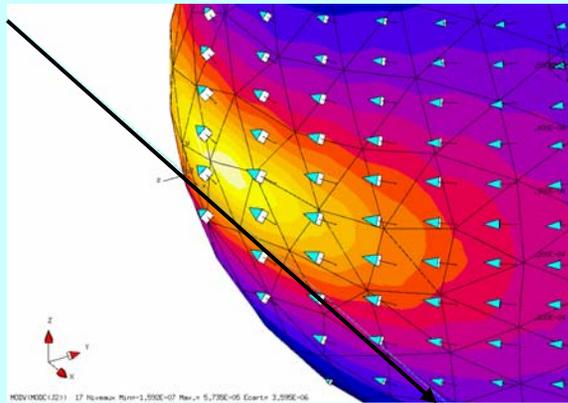
1 fil



2 fils +/-

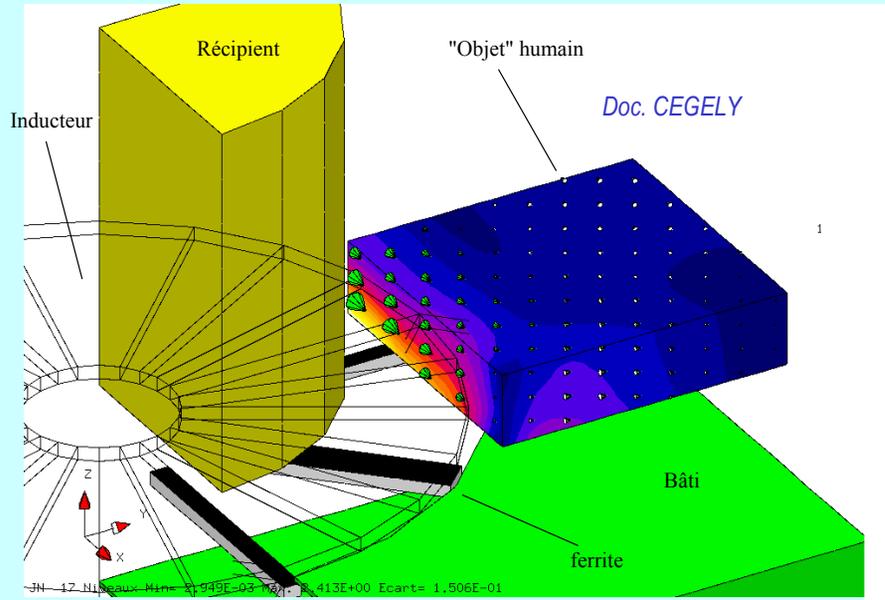


Spire

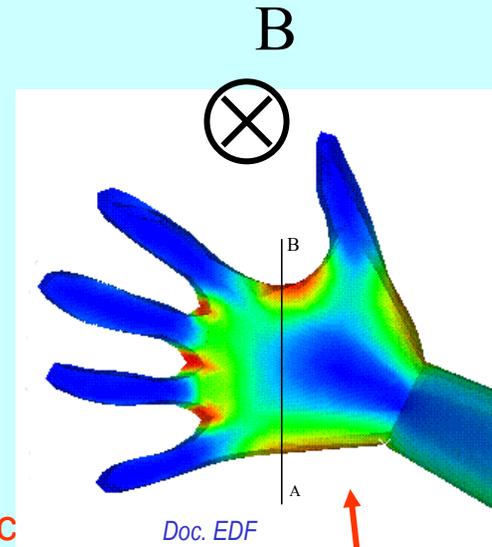


(\* ) Doc. Flux3d

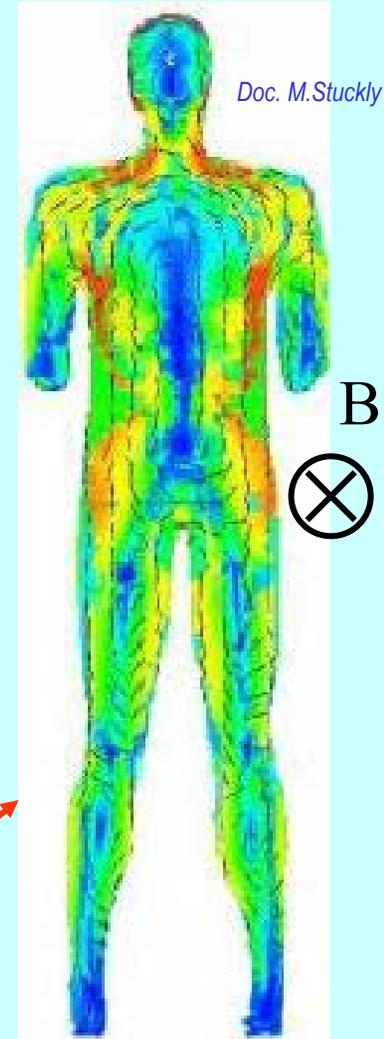
# Illustration sur des géométries plus réalistes de source ou du corps humain



Plaque à induction ( $f = 25 \text{ kHz}$ ): Calcul 3D avec source détaillée et « objet » humain simplifié

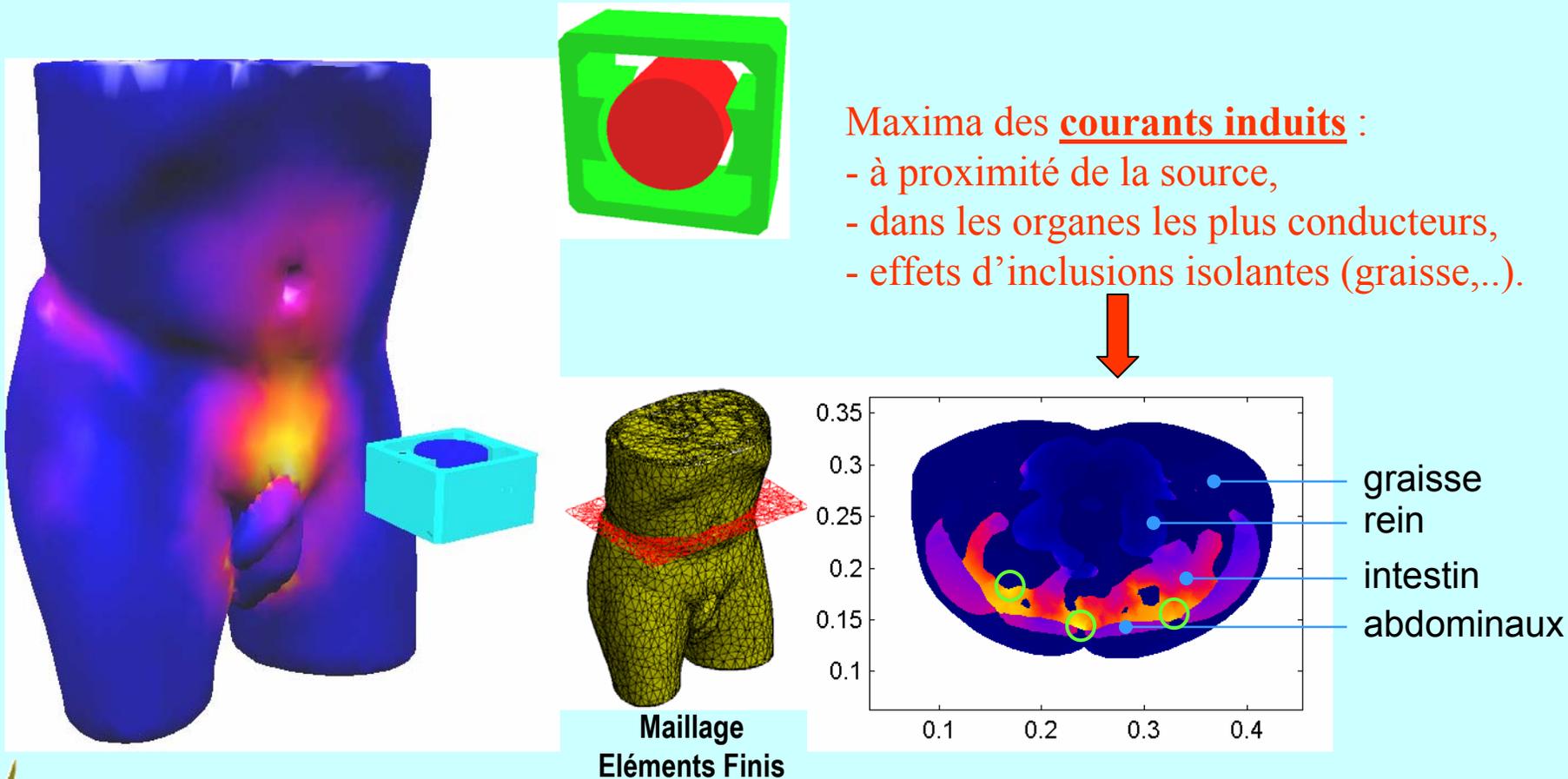


Calculs 3D avec source uniforme et corps humain détaillé



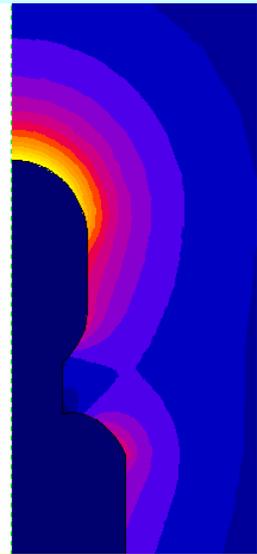
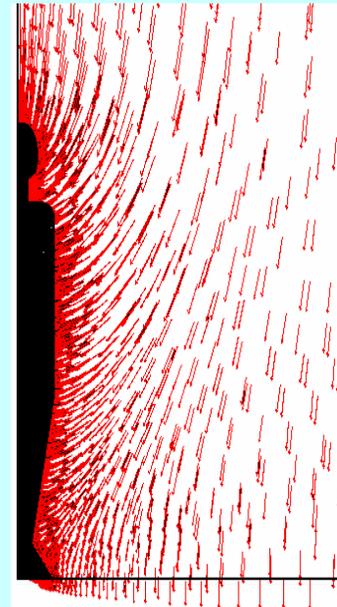
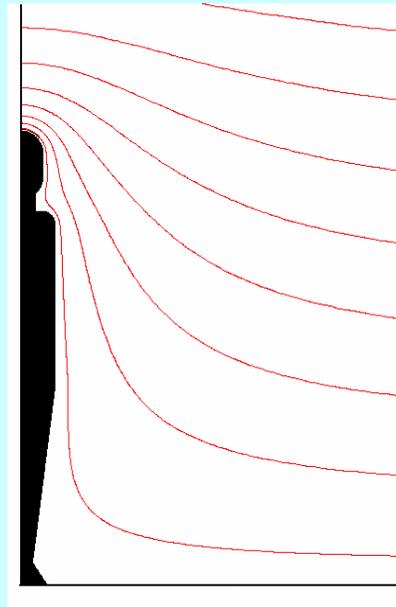
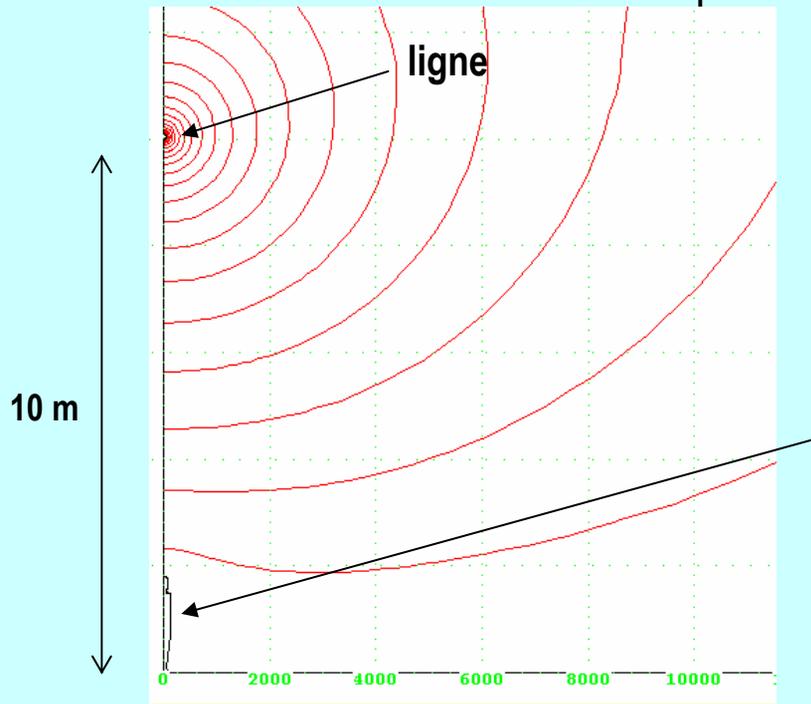
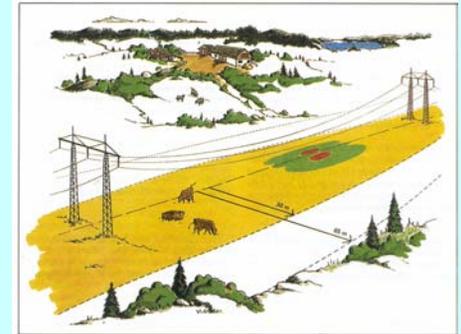
# Champ H : résultats 3D avec des géométries réalistes de source et du corps

- Exposition au champ rayonné par un système électrotechnique.



# Illustration des phénomènes en champ électrique E

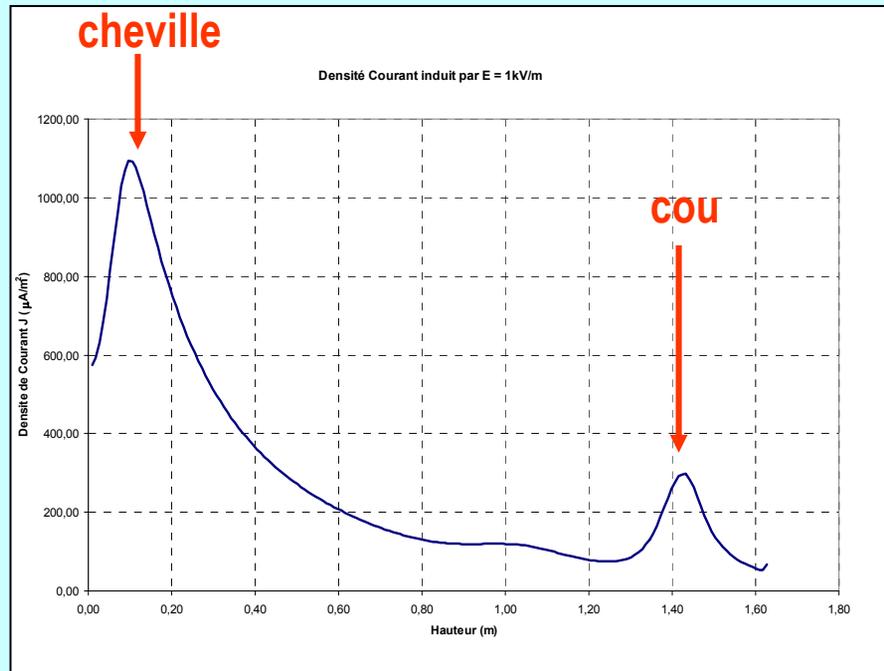
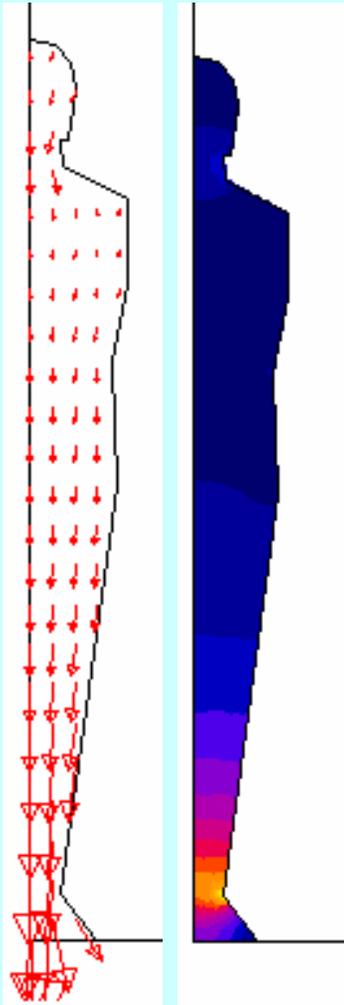
- Perturbation de E par le corps.
- Influence de  $\sigma$  et  $\epsilon_r$



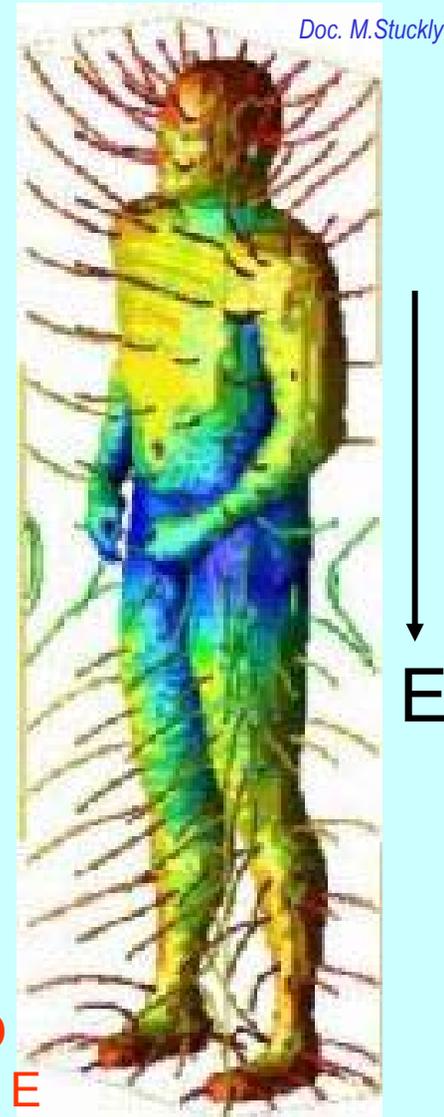
Equipotentiellles

Répartition de E

# Illustration des phénomènes en champ électrique E



Variation type de la densité de courant J le long de l'axe vertical (corps homogène)



Calcul 3D axisymétrique  
Courants induits

Calcul 3D  
Répartition E

# Conclusions

- Phénomènes électromagnétiques complexes en BF.
- Courants induits par les champs E et H différents.
- Structures complexes et matériaux des sources et du corps humain.
- Très faibles conductivités des organes → Très faibles valeurs de courants induits.
- Courants induits non mesurables.
- Modélisation numérique des phénomènes pour comprendre, quantifier, et localiser avec précision les maxima,....