



# RAAMO: « Robot Anguille Autonome pour Milieux Opaques »

*ANR PSY-ROB 06*

*Durée: 4 ans, début: Juin 07 , coordinateur: Frédéric Boyer (EMN-IRCCyN)*

*Financement: ANR (858 Keuros)*

*20 chercheurs - ingénieurs – techniciens*

*6 UMR, 4 sec. du CNRS: Biologie, Physique, STIC, SPI*

*2 Décembre 2008, Nantes*

# Plan

- Objectifs de RAAMO
- Concepts
- Intérêts du sens électrique
- Points durs
- Résultats (vue d'ensemble)
- Résultats Lot/Lot

# Objectifs de RAAMO

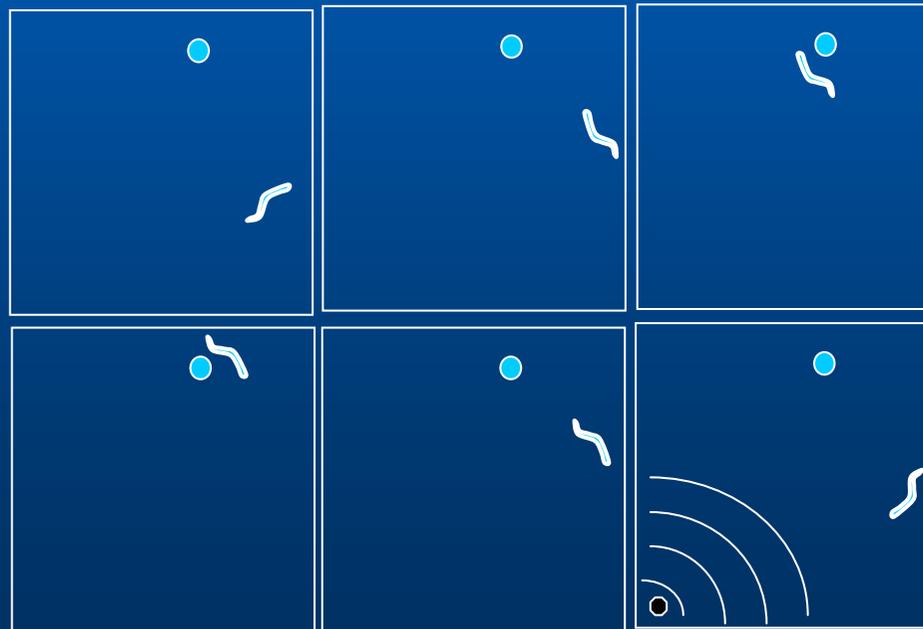
Réaliser un robot nageur bio-inspiré de l'anguille

- capable de nager dans les trois dimensions en mode télé-opéré (objectif Robea)
- doté d'un sens original bio-inspiré des poissons: le sens électrique.
- capable de naviguer en mode autonome dans des environnements où la vision et les hélices n'opèrent plus, i.e. les eaux sales des égouts industriels...

# Objectifs de RAAMO

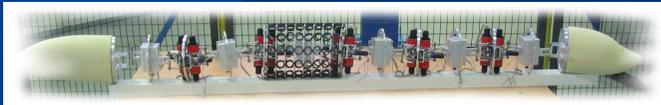
Le robot dans une piscine (dans le noir)

- évite les parois
- reconnaît des objets d'intérêt



# Concepts de RAAMO

Basé sur l'intelligence incarnée dans la morphologie anguilliforme

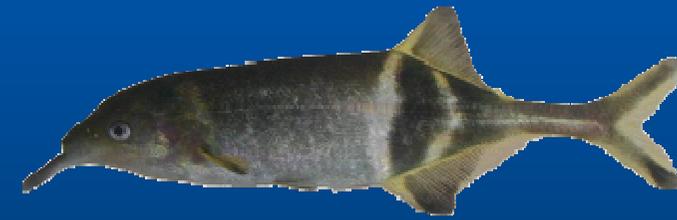
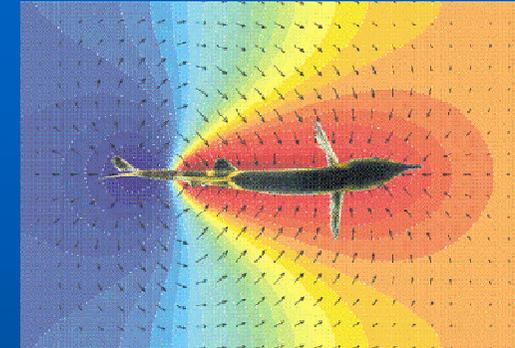
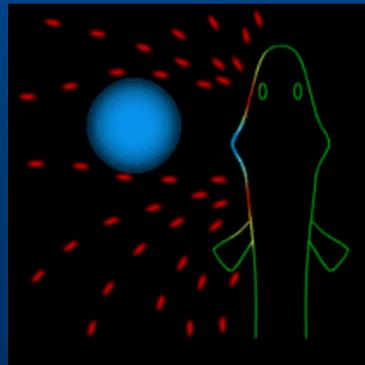
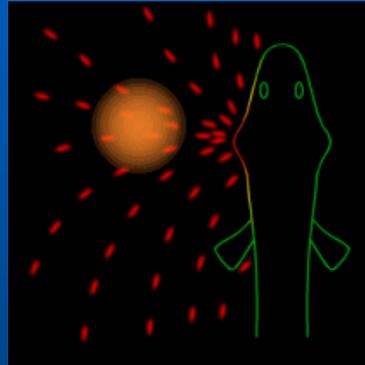
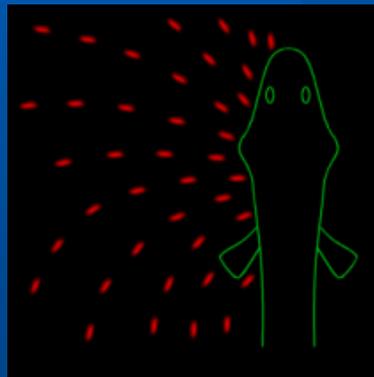


- **Agilité:** Les nageurs anguilliformes vivent dans des milieux très contraints...
- **Efficacité:** Ils peuvent nager sur de longues distances...
- **Adaptabilité:** peuvent nager dans l'eau mais aussi onduler sur le sol...

Et ce avec une géométrie simple

# Concepts de RAAMO

## Le sens électrique: principe

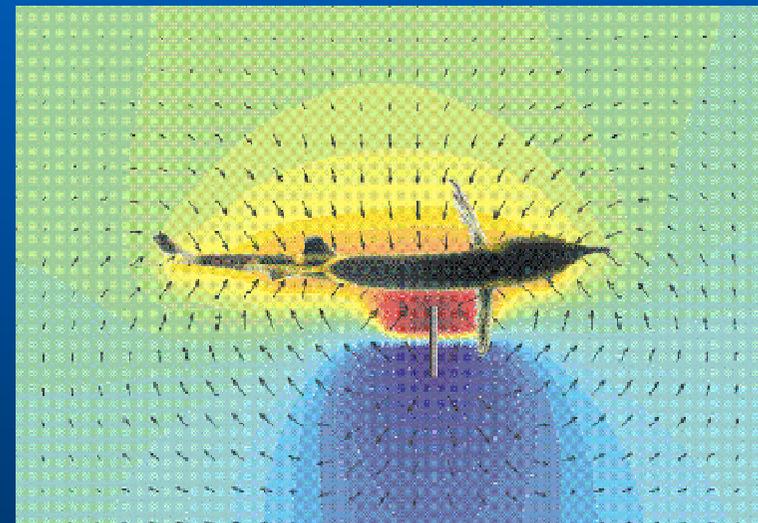


*Gnathonemus petersii*

En comparant les courants transcutanés avec et sans objets le poisson perçoit (forme, situation, couleur électrique...)

# Intérêt du sens électrique

- fonctionne dans les eaux troubles
- n'est pas dégradé par la présence de particules...
- sert pour l'électrolocation et la communication
- Omnidirectionnel
- « Vision » en profondeur des objets
- donne des infos sur la nature matérielle des objets (vivants ou non...)



# Points durs de RAAMO

## 1) Modèles et algorithmes de la perception électrique

- Problème inverse en temps réel

## 2) Peau très contrainte

- raide en pression, molle en flexion (torsion)
- étanche, démontable, +... contraintes électriques

## 3) Mise au point d'un capteur aux performances sévères:

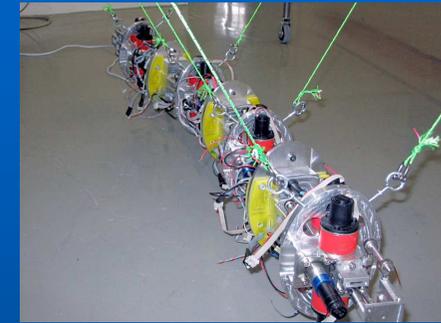
- rapport « signal/bruit »
- miniaturisation
- intégration
- acquisition rapide

# Résultats de RAAMO

L1

## *Prototype:*

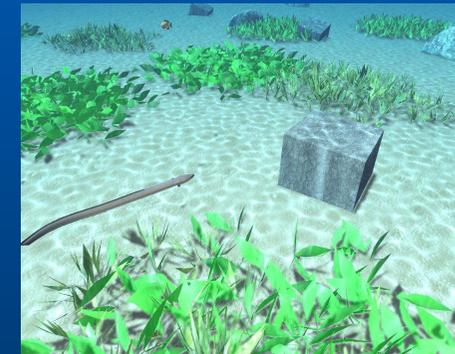
- *Toutes les solutions technologiques sont fixées: finalisation en cours*
- *Un tronçon en aquarium*
- *Le reste commandé via simulateur virtuel + joys-stick à l'air libre*



L6

## *Commande:*

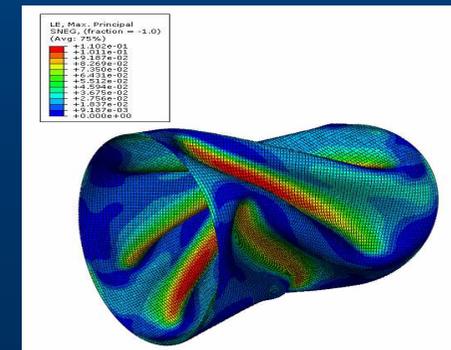
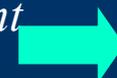
- *Lois de commande avec contrôle du roulis par la torsion et/ou les pectorales développées sur un démonstrateur virtuel en mode télé-opéré avec Joystick et implémentées sur le proto (à l'air).*



L2

## *Conception de la peau:*

- *Architecture globale de la peau adoptée et comportement du matériau et son élaboration, caractérisés.*



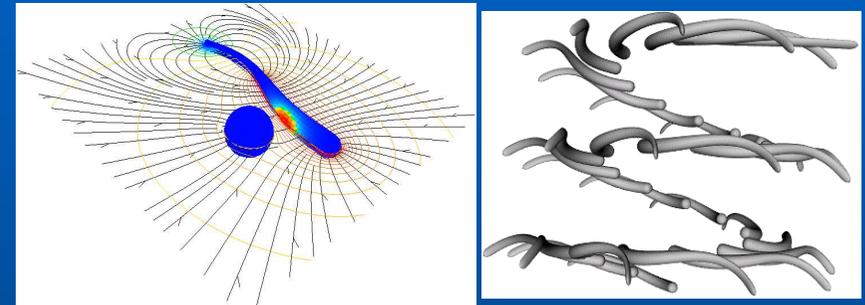
# Résultats de RAAMO

## *Modélisation électrique (directe):*

- 3 niveaux hiérarchiques (BEM, BEM-hybride, Analytiques pour l'observation)

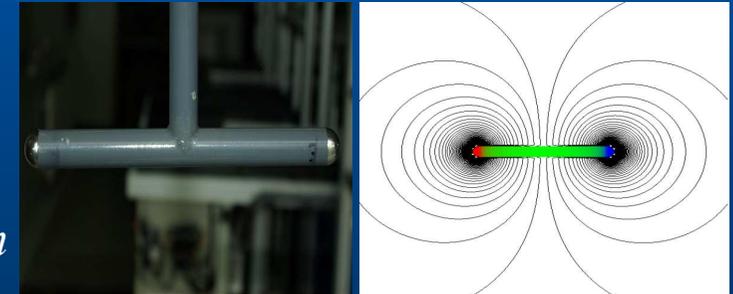
## *Modélisation mécanique:*

- 3 niveaux hiérarchiques (NS(RANSE), Fluide parfait, analytique pour la commande)



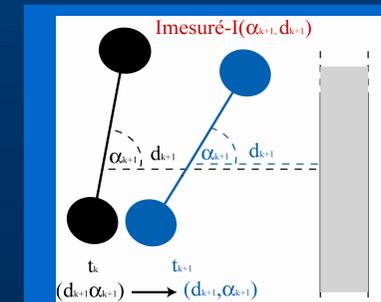
## *Perception électrique (hard):*

- Conception de 2 maquettes de capteurs
- Étude d'un mode de mesure (électronique)
- Première série de mesure réalisée
- Mise en place d'un banc d'essais pour l'électrolocation



## *Perception électrique (soft):*

- Observateurs pour l'évitement et le suivi de parois
- Étude des indices de perception
- Formulation de problèmes inverse

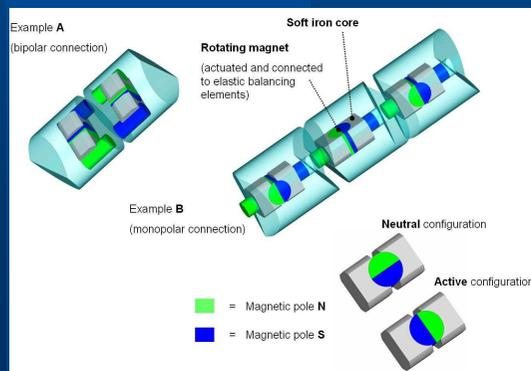
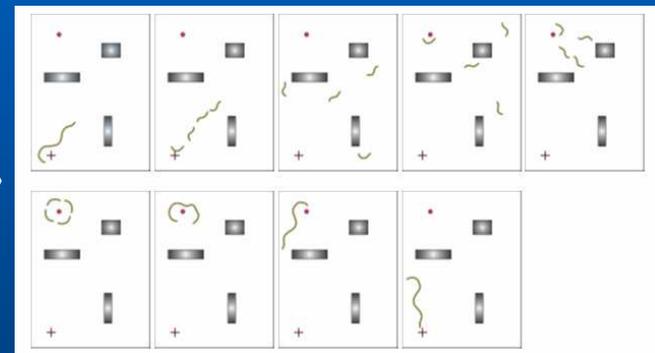


# Résultat de RAAMO: ANGELS

( Steps du FP7 call "Embodied Intelligence")

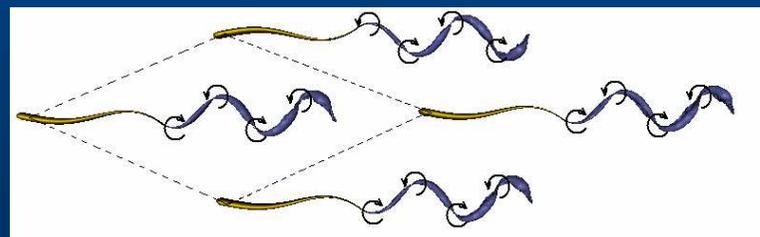
Fabriquer un robot anguille re-configurable (mécaniquement et électriquement)

Prototype IRCCyN + ...

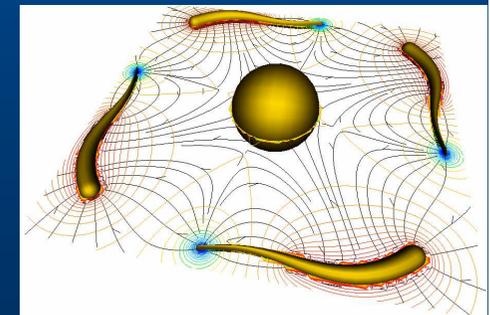


... système de docking

Coordination multi-agents pour ...



... la réduction de traînée



La perception par partage d'un champ électrique ...

# Impacts de RAAMO

- Contribuer à une nouvelle génération d'AUV pour un large spectre d'usage (en particulier dans des eaux sales où les moyens standards de locomotion et de perception échouent).
- Développer un sens nouveau pour la robotique sur le continent Européen
- Concevoir et réaliser des technologies brevetables (capteur)
- Développer des méthodes de traitement de l'information pour ce sens
- Initier des travaux de "reverse engineering" afin d'éprouver les paradigmes et conjectures des biologistes et de contribuer à répondre à la question : "qu'est-ce que la perception?"
- Proposer un nouveau paradigme pour l'étude des interactions perception-action en robotique

# LOT1: Le prototype

*IRCCyN: G. Gallot , P. Lemoine, W. Khalil, J.L. Bechenec, A. Girin, Y. Trinquet, D. Chablat, P. Wenger, G. Branchu, P. Molina, S. Jolivet, M. Canu, F. Brau, M. El Rafei...*

# Le Prototype

Réalisation du prototype en deux parties

*7 vertèbres « dans l'air » pour tester les mouvements et la commande.*



*5 vertèbres équipées de la peau pour les tests d'étanchéité et mouvements dans l'eau.*



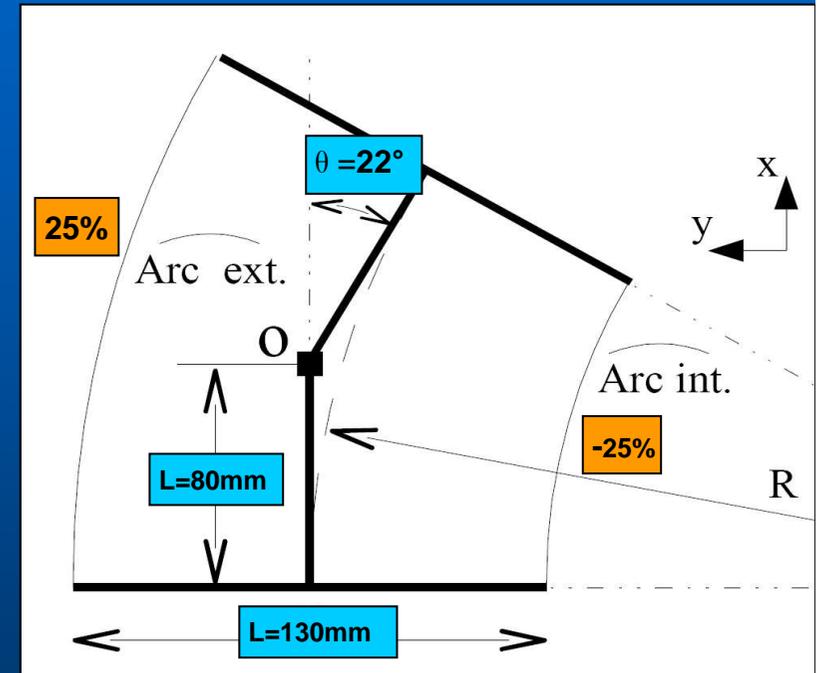
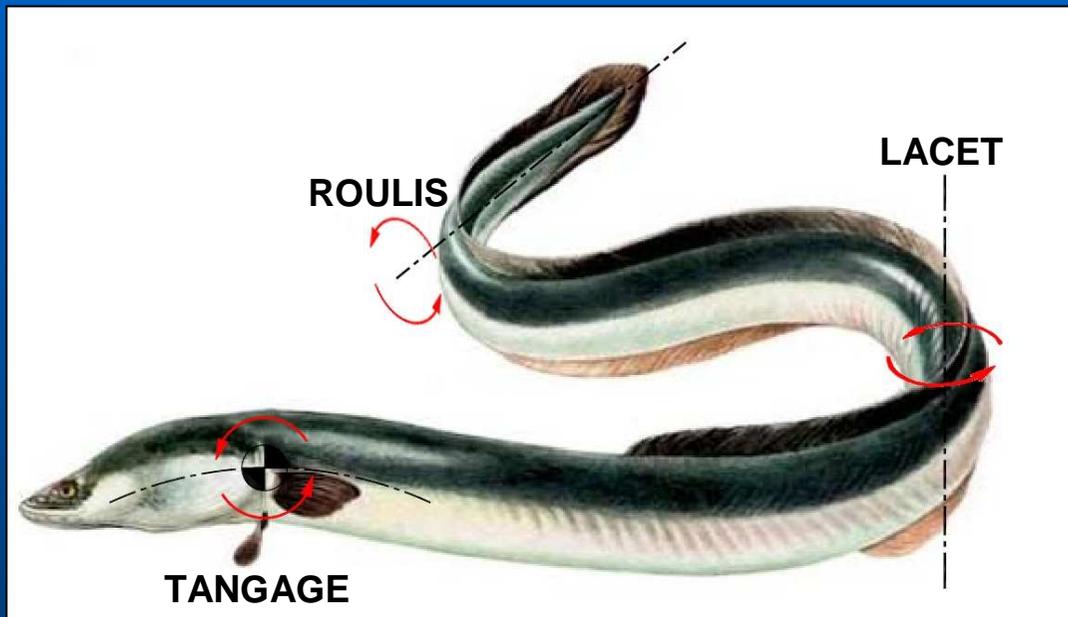
# Le Prototype



# LOT2: La peau

*3S:G. Machado, G. Chagnon, D. Favier*

# Point de départ



- **Mouvements**

- Lacet et Tangage  $\pm 22^\circ$
- Roulis  $\pm 10^\circ$
- Taux d'allongement max. de l'ordre de  $25\%$ .

# Pourquoi les Silicones?

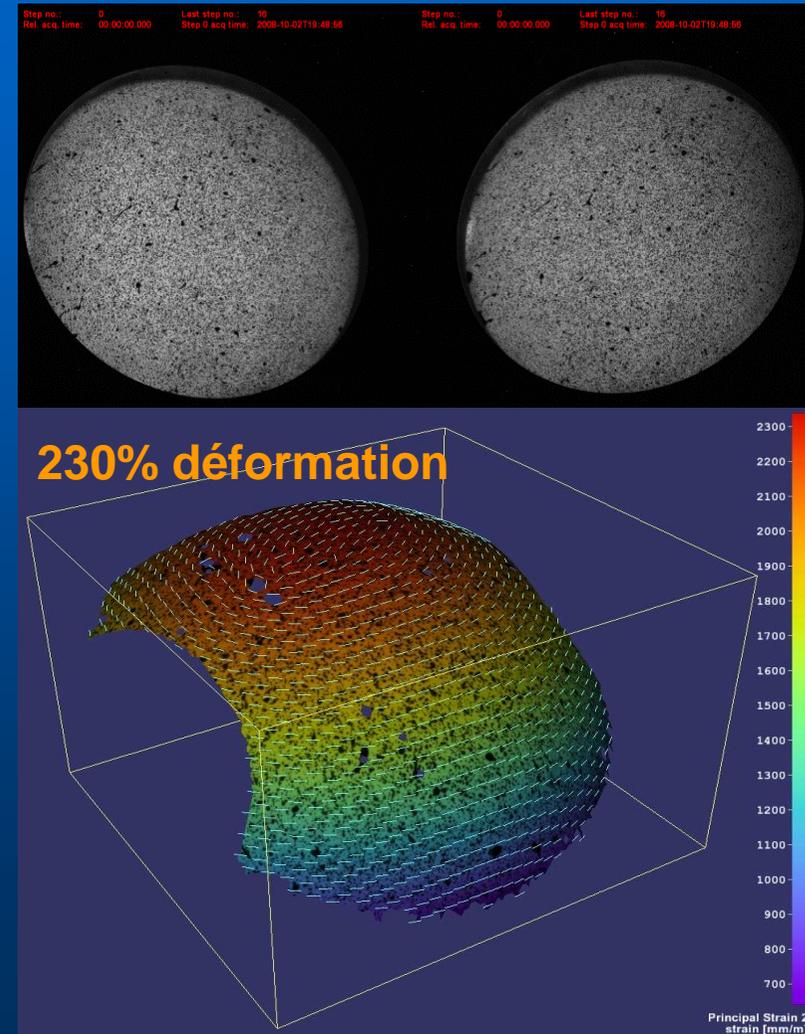
- Propriétés mécaniques (fortement déformable (600%), pour peu d'efforts)
- Facilité de mise en œuvre, manipulation, montage
- Rhodia RTV 3428



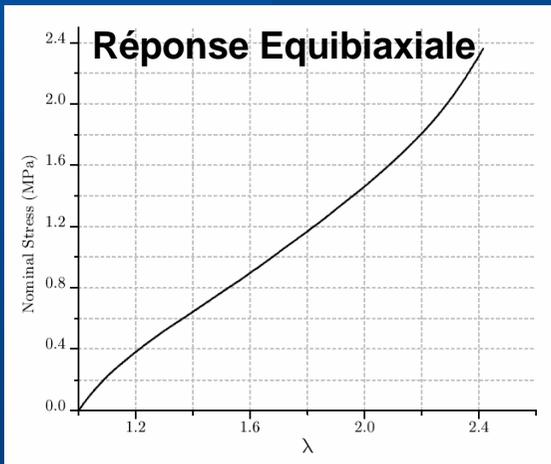
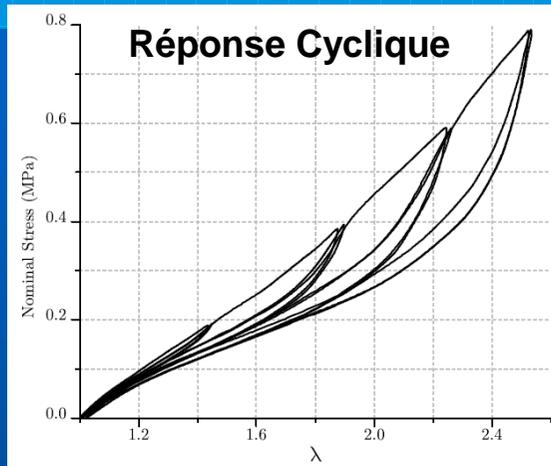
*(Essai de traction simple 3S)*

# Étude expérimentale

- Protocole de conception des éprouvettes
- Protocole d'essai
- Mise en place des moyens d'essai
- Essais sous différentes sollicitations
- Mise en évidence des phénomènes de la physiques des silicones (hystérésis...)

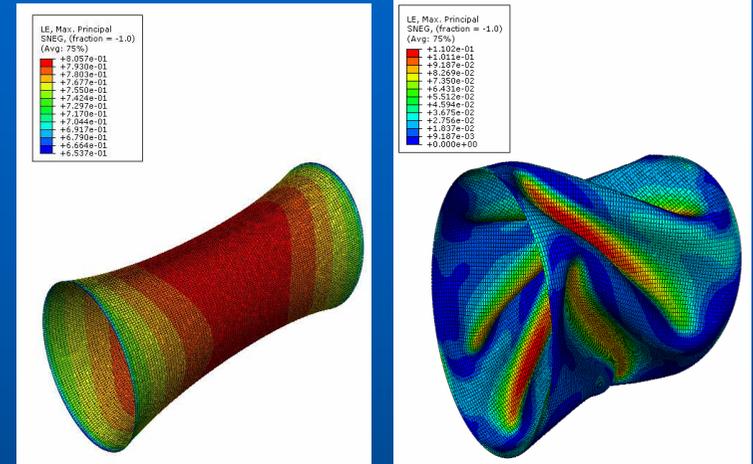


# Recherche d'un comportement optimal



+ Effets anisotropes

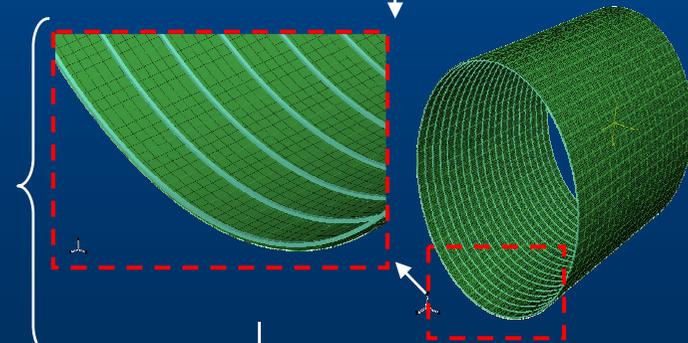
**Modèle  
Hyperélastique  
Anisotrope**



**Traction**

**Torsion**

Codes EF



Etude des renforts

# LOT3: La modélisation

*IRCCyN, SUBATECH, LMF Nantes: P.B. Gossiaux, M. Porez,  
A. Leroyer, M. Visonneau, M. Chergui, F. Candelier, F. Boyer*

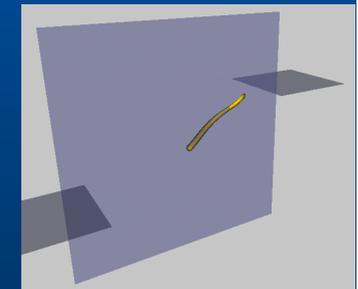
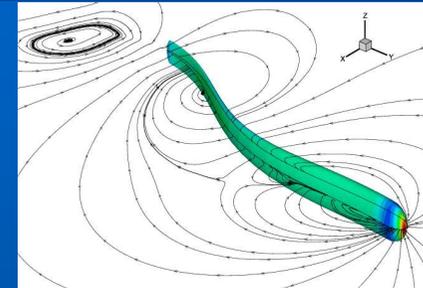
# Modélisation mécanique

## Acquis:

- Premier code NS de la nage autopropulsée (ISIS) [JFS 04]
- Extension de l'approche de NE des manipulateurs multi-corps aux locomoteurs multicorps et continus (modèles macro-continus)
- Extension de la large amplitude elongated body theory de Lighthill (1970) au cas :
  - De la nage 3D - auto-propulsée [IEEE-MCY 06],
  - Avec résolution de la dynamique interne (inverse) [IEEE-TRA 05]
  - Tourne en temps réel et 10% d'écarts / NS [IEEE-TRA 08]

## Résultats RAAMO:

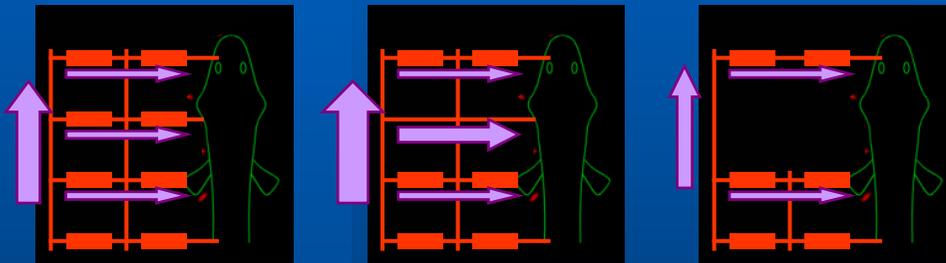
- Formulation variationnelle du même modèle (plus pure) [JNLS]
- Optimisation énergétique des lois de nage avec validation NS [FIV 08]
- Premières simulations NS mettant en jeu des déformations 3D (en cours...)



# La modélisation électrique

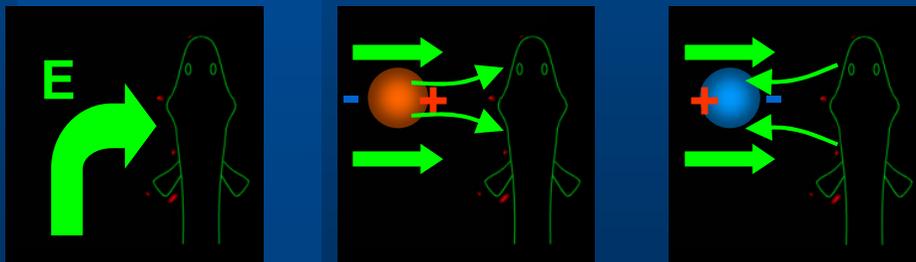
2 interprétations physiques du même phénomène...

## 1) Electro-cinétique



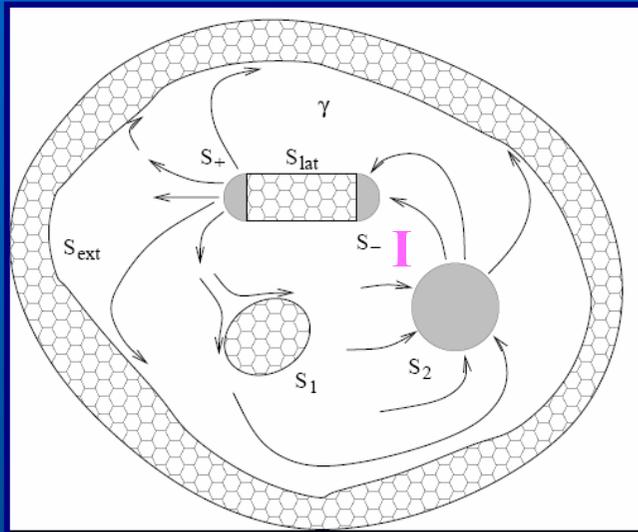
Milieu conducteur ambiant voit sa résistivité modifiée localement

## 2) Electro-statique



Les surfaces des objets immergés se chargent  $\Rightarrow$  multi-pôles induits  $\Rightarrow$  modif du champ E sur la peau

# Point de vue physique adopté



Basses fréquences ( $\approx 10\text{kHz}$ )  $\Rightarrow$  régime ARQS  $\Rightarrow$  effet dominant: conductivité  $\gamma$

$$\text{div}(\mathbf{j}) = 0 \text{ et } \mathbf{j} = \gamma \mathbf{E} \Rightarrow \text{div}(\mathbf{E}) = 0$$
$$\mathbf{E} = -\text{grad}(V)$$



$$\left. \begin{array}{l} \text{Equation de Laplace: } \Delta V = 0 \\ + \text{ C.L. (Neuman, Dirichlet)} \end{array} \right\}$$

- **Problème direct:** Ddp imposées, géométrie, physique connue, on cherche les courants transcutanés
- **Problème inverse:** Tensions imposées, courants connus, on cherche la géométrie et la physique de la scène

# Approche de modélisation hiérarchique

Modèle électrocinétique BEM

Equation de Laplace  $\Delta V=0$  + C.L.

Id. Green et maillage des surfaces

$$A V + B E_{\perp} = 0 \text{ (sur les surfaces)}$$

Resol./ inconnues de frontière et reconstruction dans le domaine.

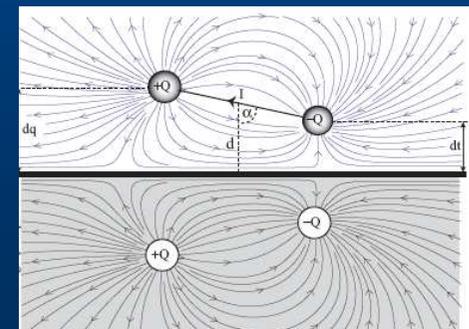
Modèle BEM "Hybride"

Capteur  $\approx$  dipôle et objets externes par la BEM

Modèle rapide multipolaire

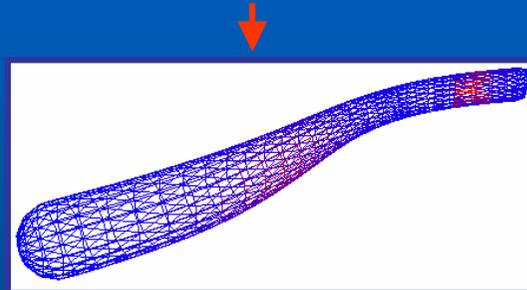
Capteur  $\approx$  dipôle et objets externes = plans, demi-plans, ... traités par la **méthode des images**.

Rapide (temps réel) mais géométrie restreinte

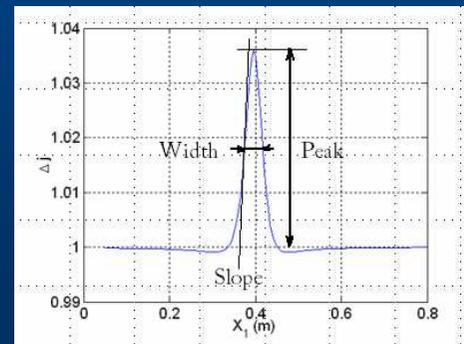
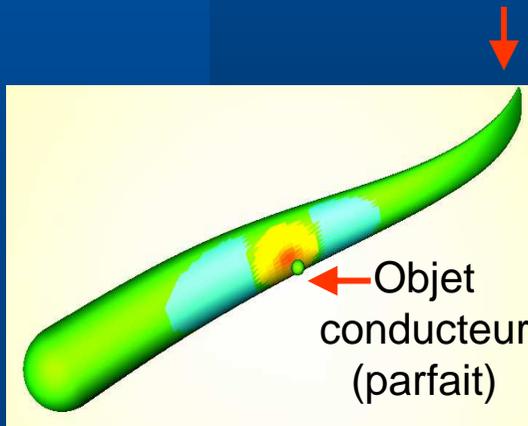


# Résultats LOT3

- BEM appliquée au modèle continu : robot = poisson



- Étude de l'influence de *petits objets*

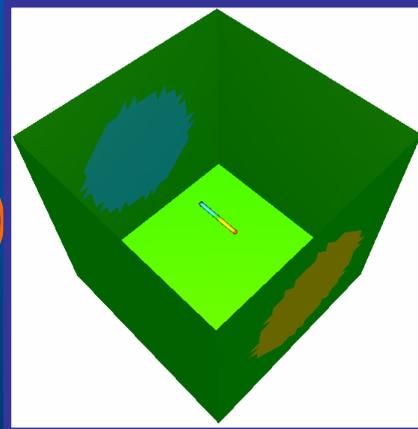
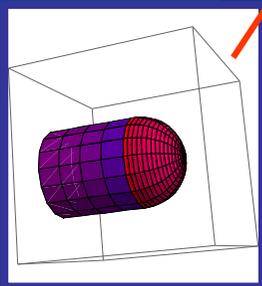


Courants transcut.

*Conforme /  
Exp. biologistes*

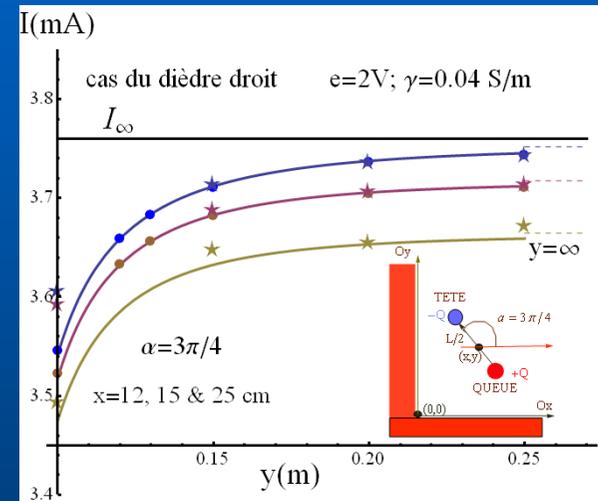
# Résultats LOT3

\* BEM appliquée au cas du capteur dans l'aquarium



Capteur: 520 él.  
Aquarium: 4332 él.

*Etoiles: full BEM, Points: BEM Hybride, Continu: Analytique*



*Étude de l'effet des parois sur le courant total*

Cohérence des 3 niveaux hiérarchiques

# Perspectives à court et moyen termes

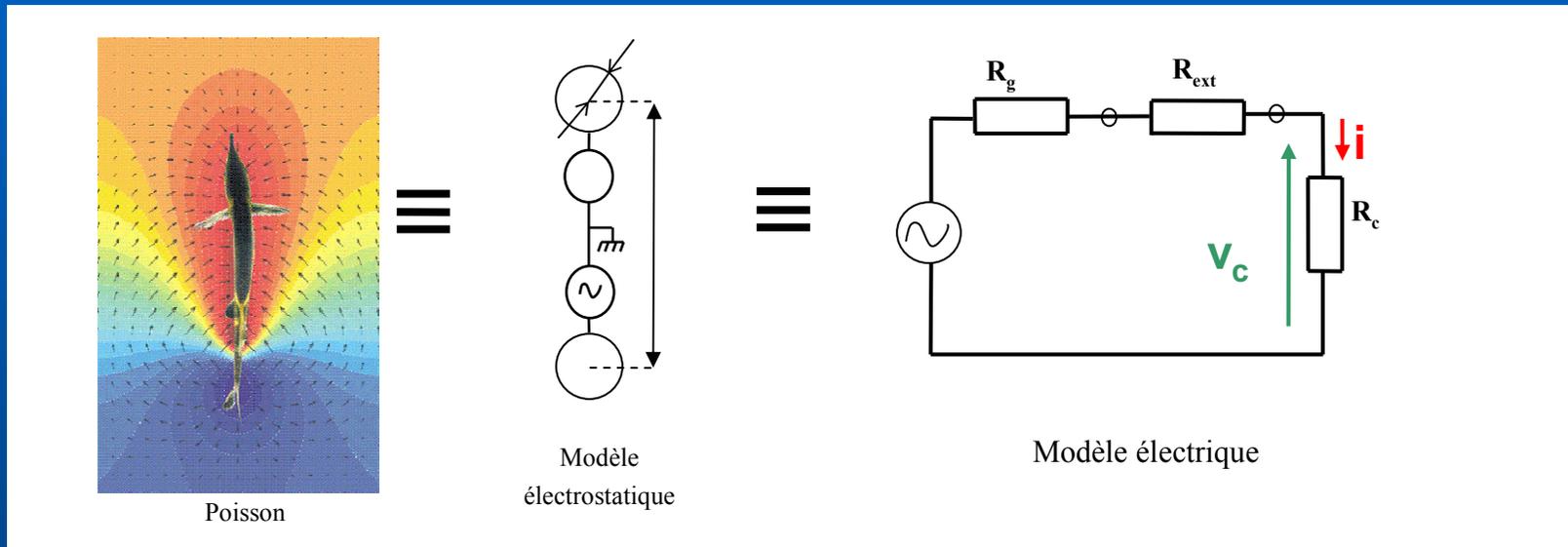
- Validation du paradigme physique via mesures sur capteur + aquarium
- Calcul des matrices de conductance pour la maquette “multi-polaire”
- Mathématisation du Problème inverse
- Étude de la réduction de modèle
- Couplage au modèle de la nage (poisson virtuel)

# LOT4: Le capteur

*SUBATECH, IRCCyN: S. Bouvier, N. Servagent, M. Chergui,  
A. Girin, M. Canu*

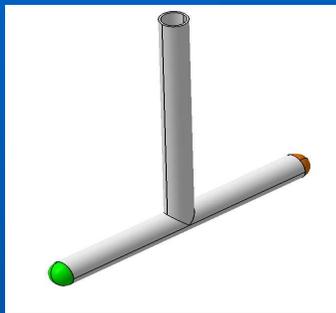
# Choix de la méthode de mesure

- Modélisation électrique de la sonde

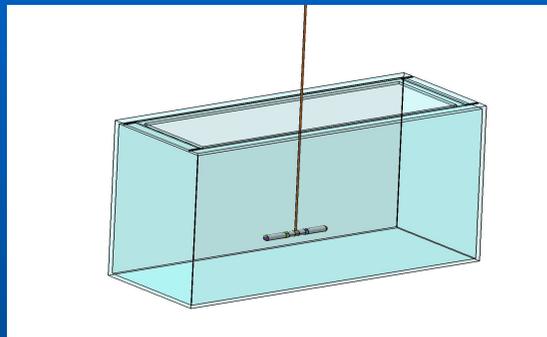


- Objectif de la mesure : déterminer les variations de  $R_{ext}$
- Étude du capteur / grandeurs physiques générées ( $U$  ou  $I$ ) et mesurées ( $U$  ou  $I$ )
- Choix du mode : génération de tension et mesure en courant

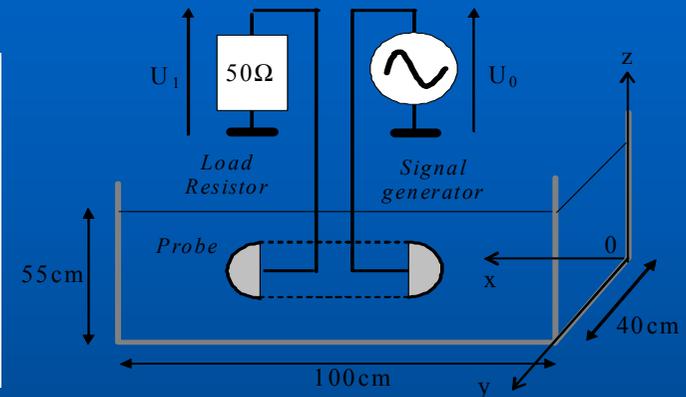
# Premières mesures expérimentales



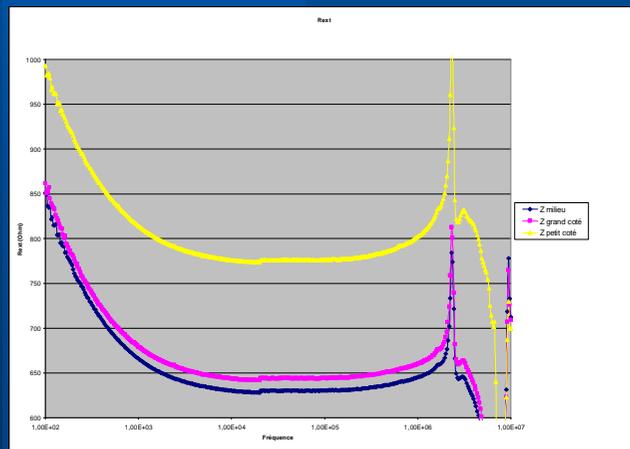
Sonde bipolaire



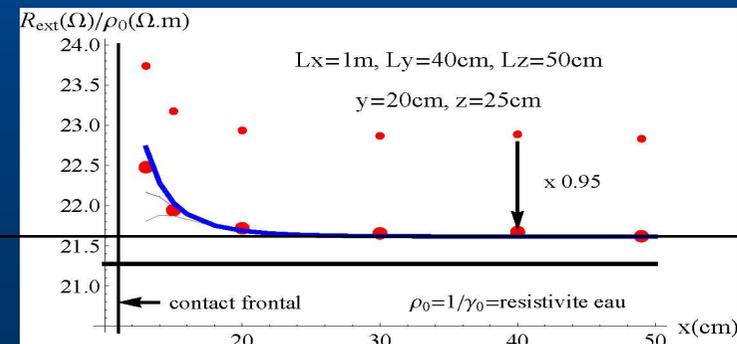
Aquarium de dimension  
100x40x50 cm<sup>3</sup>



Dispositif expérimental



Balayage en fréquence  
choix de la fréquence : 20kHz



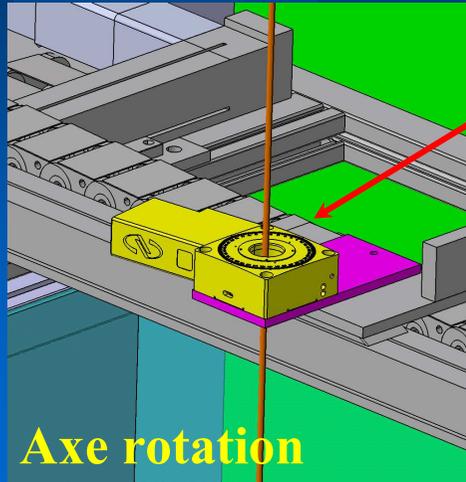
1/1000

Comparaison entre le calcul théorique  
et la mesure

# Premières mesures expérimentales

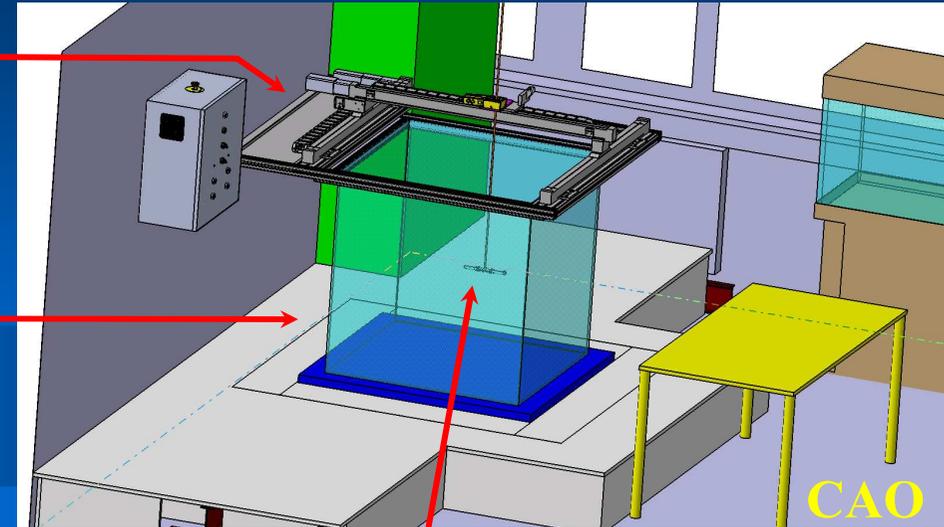
- **Contraintes fortes :**
  - Mesure d'une variation de  $R_{ext}$  de l'ordre de 1/1000
  - Conductivité ambiante = fonction (milieux, température)
- **Éléments de solution:**
  - Augmentation de la résolution → sonde multipolaire
  - Réduction des bruits (filtrage, « moyennage » du signal)
  - Mesure différentielle / un point zéro (= mesure en milieu infini)
  - Auto calibrage / la conductivité de l'eau
- **Moyens**
  - Simulation BEM
  - Tests sur banc expérimental

# Banc expérimental électrolocalisation



**Robot 3 axes**  
(1 rotation, 2 translations)

**Axe rotation**



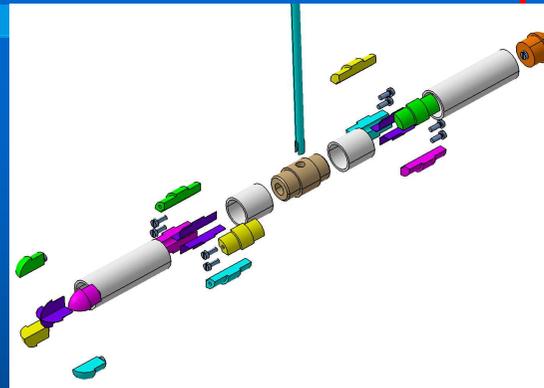
**Aquarium**  
 $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$

**CAO**

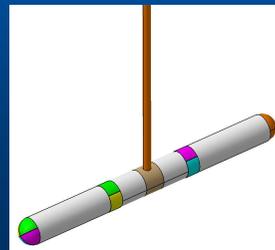


**Réel 17-11-08**

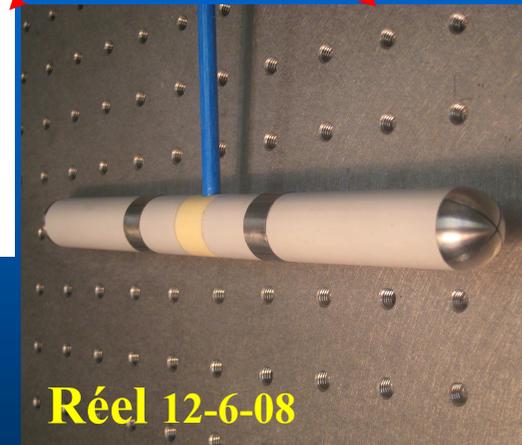
**Robot cartésien & capteur**



**Sonde**  
**multi-polaire**



**13 pôles**



**Réel 12-6-08**

# LOT5: La perception

*UNIC, IRCCyN, SUBATECH, GYPSA: K. Grant, C. Chevallereau, G. Baffet, P.B. Gossiaux, M. Porez, A. Girin F. Boyer*

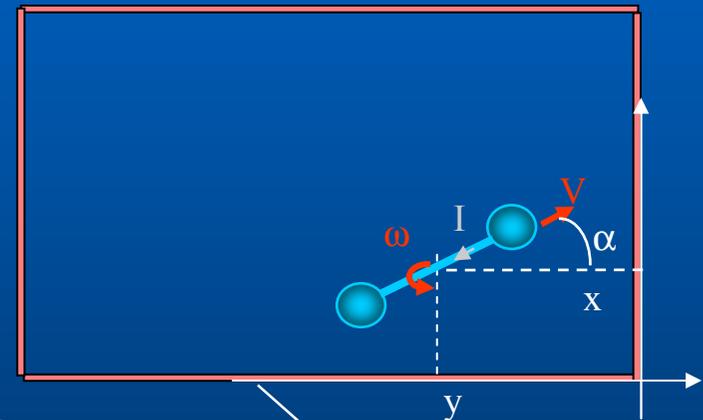
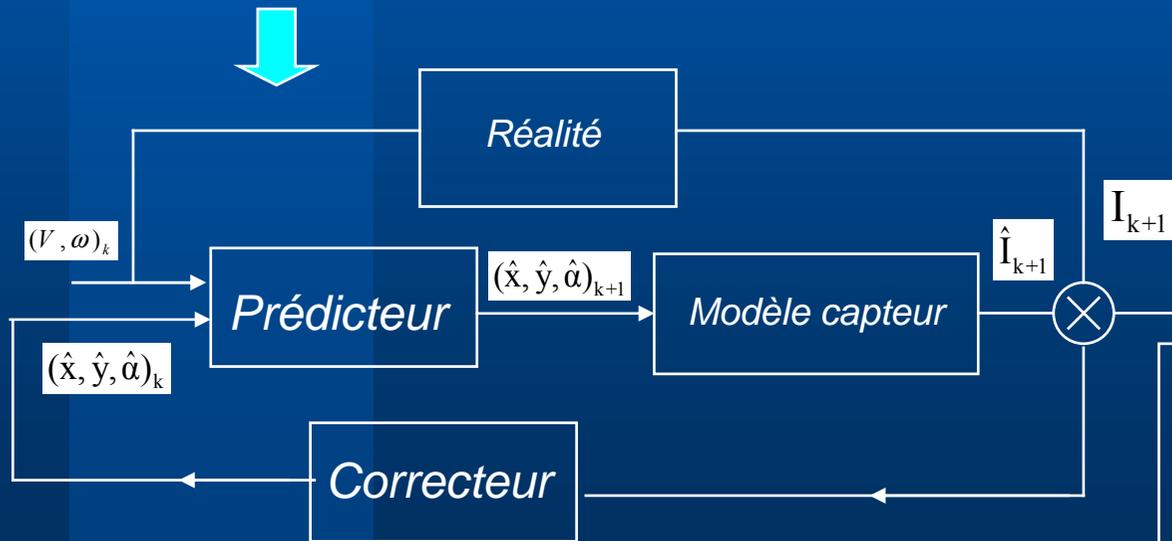
# Perception de niveau navigation

Pb: Navigation dans un aquarium (environnement connu)

But : déterminer  $(x, y, \alpha)$  à chaque instant.

Commandes = vitesses , mesures = courant.

Solution : filtre « prédicteur - correcteur »



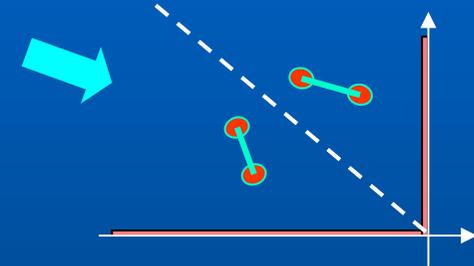
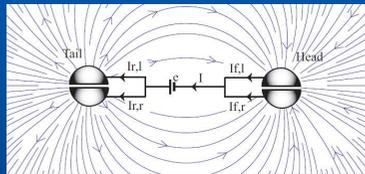
Filtres testés :

- Filtre de Kalman étendu
- Filtre de Kalman sans parfum (pas de linéarisation du modèle)

# Perception de niveau navigation

- Étude théorique : Problèmes d'indiscernabilité [CIFA 08, Robio 08]

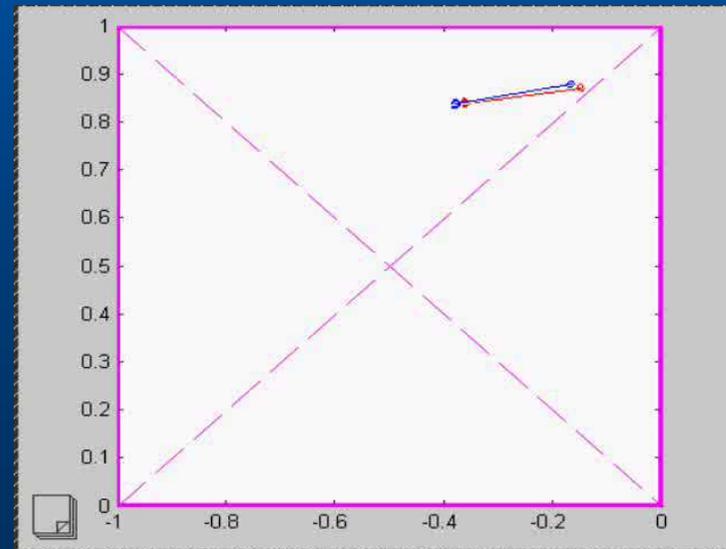
- 
- *Mouvements avec rotation du "poisson"*
  - *Augmenter la résolution capteur*



- Simulation

- 
- *Suivi du bord de l'aquarium*
  - *Prédiction de la mesure du courant avec modèles analytiques des 4 coins*
  - *Filtre de Kalman sans parfum*
  - *Bouclage sur l'observateur*

→ Test expérimental en développement



# En partant des modèle BEM...

- Étude des indices de perception des biologistes
- Mathématisation du Problème inverse (objets isolants)

i.e. de Fonctions liant les caractéristiques des images électriques aux variables géométriques

$$A V + B E_{\perp} = 0$$



Forme explicite des courants:

$$J_c = KV$$



Inversion  
(petits objets)

Où  $K$  est une fonction numérique de la géométrie (+ ou – complexe selon le degré de connaissance à priori)

On pose le pb d'optimisation: trouver la géométrie de la scène  $p$  tq:

$$p = \min_{\hat{p}} \|\hat{J}_c - J_c\| = \min_{\hat{p}} \|(\hat{K} - K)V\|$$



*Automatique: Par observation (en ligne)*  
*Imagerie médicale: technique EEG (hors ligne)*

# LOT6: La commande

*GIPSA Lab: M. Alamir, M. El Rafei, N. Marchand*

# Commande 3D

## La méthodologie

Cas le plus critique: commande avec stabilisation du roulis sans pectorales...

Choix des variables de commande

Obtention d'un modèle réduit moyen compatible avec ce choix

$$x^+ = f(x, u) \quad ; \quad y := \begin{pmatrix} \text{Vecteur vitesse de la tête} \\ \text{angle de roulis} \end{pmatrix} = h(x)$$

Utilisation du modèle réduit pour la conception de lois de commande avancées permettant:

- La poursuite d'un point cible
- Le contrôle du roulis
- Tout en respectant les contraintes

Validation des lois de commande sur le modèle complet macro-continu

# Commande 3D

## Les variables de commande

$K(\cdot, \cdot)$  La loi de courbure le long du corps

### Partie avant

Ondulation en lacet uniquement

$$K_3(t, X) = u_3 \cdot A(X, u_2) \sin\left(\frac{X}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) + u_1$$

### Partie arrière

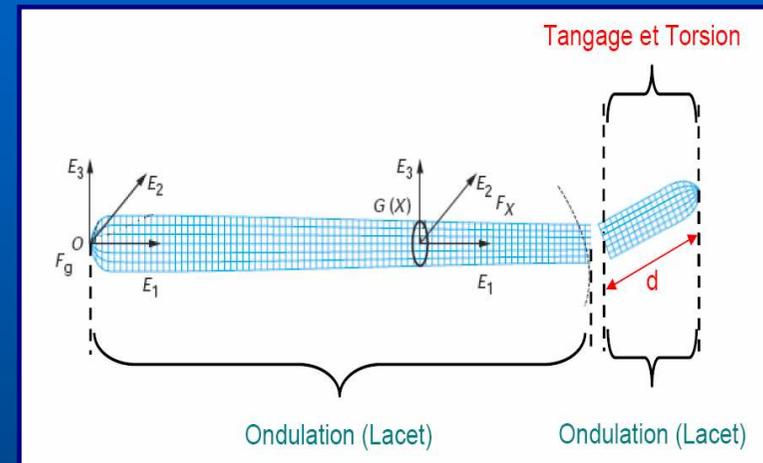
En plus du lacet, torsion et tangage

$$K_1(t, X) = \alpha \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad ; \quad K_2(t, X) = \beta \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$



Paramétrisation de la loi :

$$u := (u_1, u_2, u_3, \alpha, \beta)$$



Commande sans nageoires pectorales

Amplitude des ondulations

Courbure additionnelle en lacet

Sens de l'onde

# Commande 3D

## La commande

Incrément idéal du vecteur vitesse

$$\delta V_d^+ = \lambda \cdot \left[ \vec{V}_{ref}^+ - \vec{V}^+ |_{\delta u=0} \right]$$

Utilisant le modèle réduit moyen, on obtient

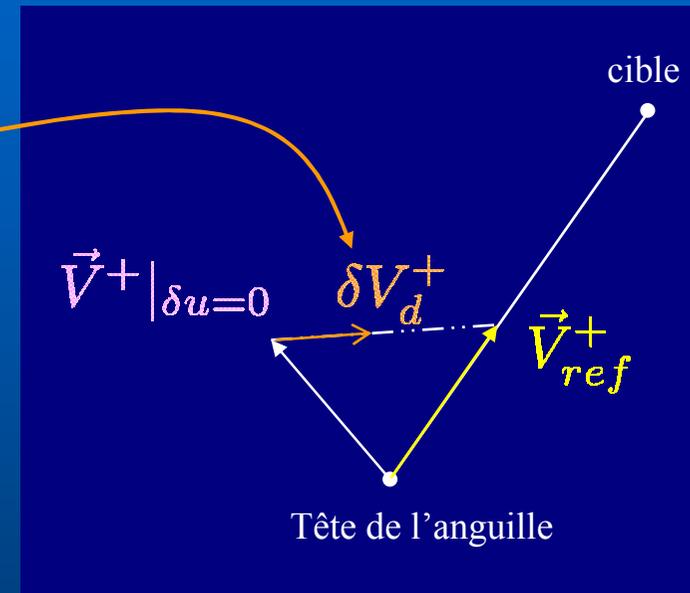
$$\begin{cases} \delta V^+ = M(x) \cdot \delta u \\ \delta \theta_r^+ = L(x) + N(x) \cdot \delta u \end{cases}$$

Poursuite du point cible

Contrôle du roulis

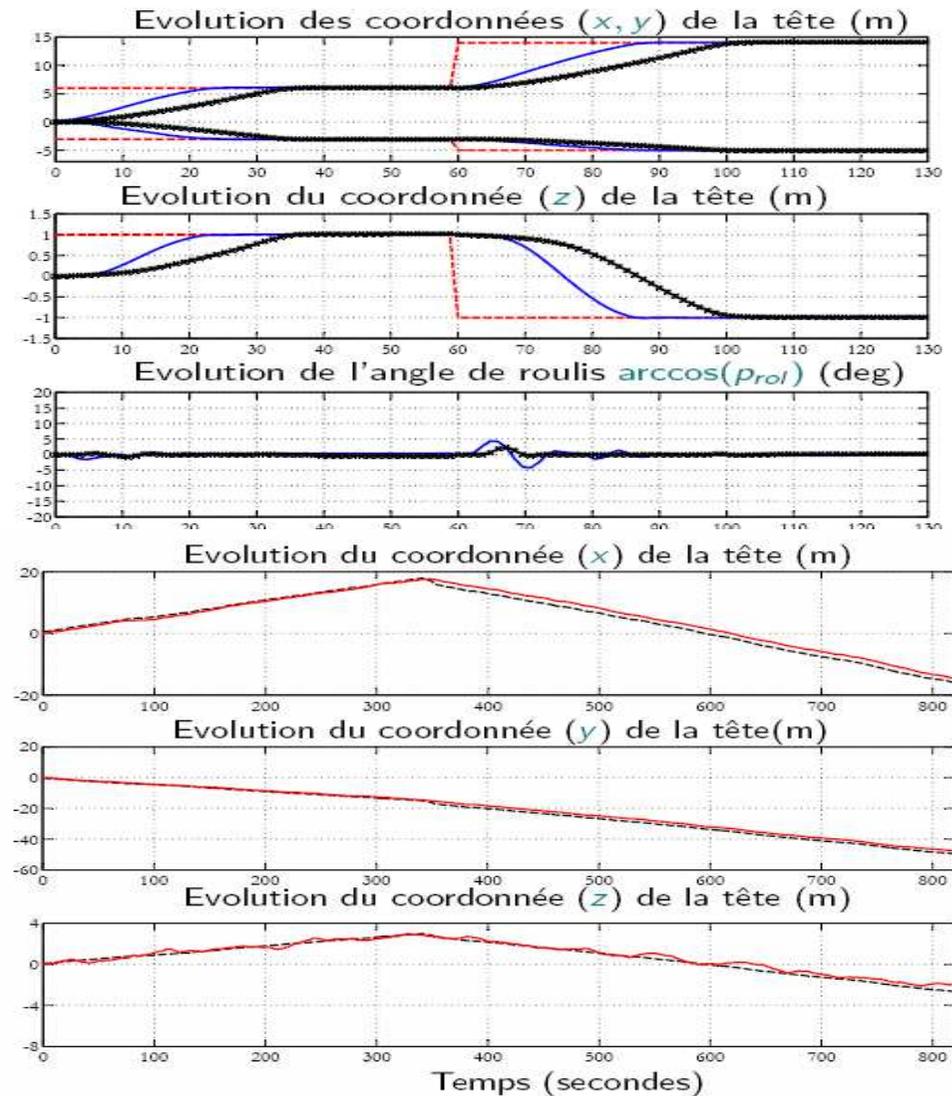
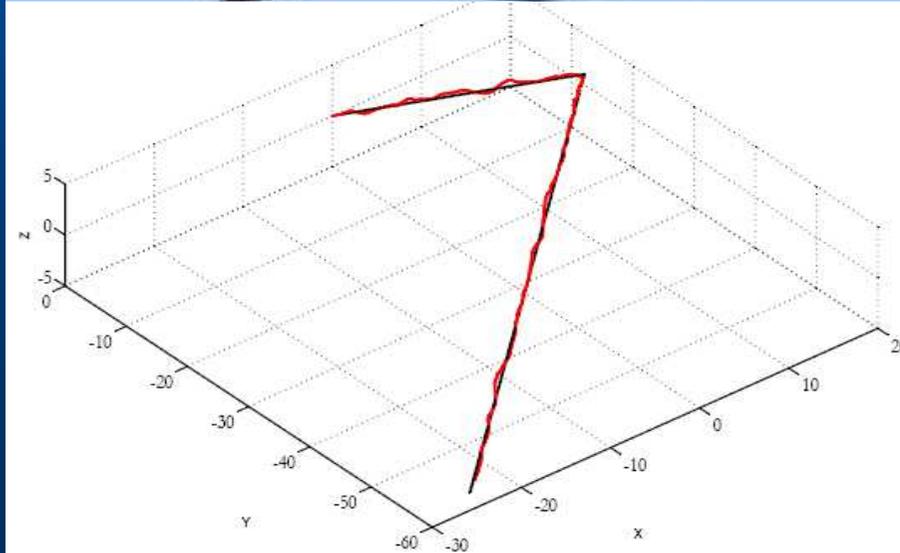
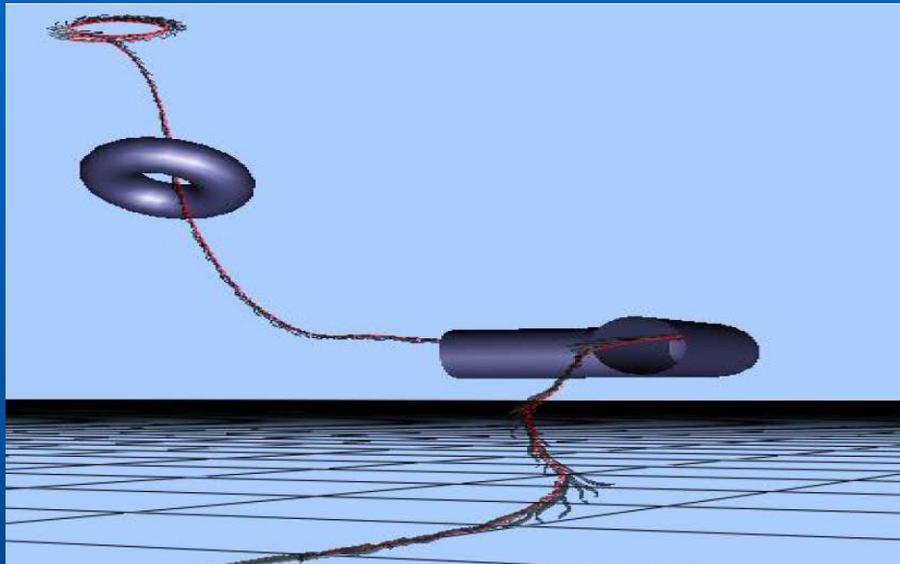
$$\begin{pmatrix} \delta V^+ \\ \delta \theta_r^+ \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \delta V_d^+ \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\delta u = \arg \min_{\delta u \in \Delta(x,u)} \delta u^T \cdot Q(x) \cdot \delta u + f^T(x) \cdot \delta u$$



# Commande 3D

## Résultats



# Questions...?