

# 10 ans de l'institut FARMAN : Méthode DPSM et simulation d'aéronefs

*D. Placko*<sup>(1)</sup>, *A. Rivollet*<sup>(1)</sup>, *S. Gourlaouen*<sup>(1)–(2)</sup>, *J.-P. Barbot*<sup>(1)</sup>



<sup>(1)</sup>SATIE, ENS Cachan, CNRS, Université Paris-Saclay,  
61 Av. du Président Wilson 94235 Cachan Cedex, France

<sup>(2)</sup>FTSC, France

jean-pierre.barbot@satie.ens-cachan.fr



# Overview

- 1 Introduction
- 2 Principes de la méthode DPSM
- 3 DPSM et calculs aérodynamiques
- 4 Premiers résultats
- 5 Conclusion

- 1 Introduction
- 2 Principes de la méthode DPSM
- 3 DPSM et calculs aérodynamiques
- 4 Premiers résultats
- 5 Conclusion



Richard Farman  
(1872-1940)



Henry Farman  
(1874-1958)



Maurice Farman  
(1877-1964)

## Sportifs, ingénieurs, aviateurs et entrepreneurs français.

- entre 1908 et 1941, conçoivent et fabriquent  $\approx$  200 avions,
- 1919 créent une compagnie de construction aérienne,
- 1924 fondent la société des transports aériens (absorbée par Air-France en 1933)





Farman N°3 (1909)



Farman F-231 (1930)



Farman "Goliath" (1919)

- En 1909, une école de pilotage équipée d'avion Farman ouvre à Chartres,

**Depuis les avions, les transports aériens et les outils de formation des pilotes ont évolué...**

## Ainsi les simulateurs de vol sont devenus des outils indispensables...



### La simulation de vol, contribution majeure :

- dans l'amélioration de la sûreté aérienne,
- permet également de réaliser de substantielles économies,
- réduit l'impact environnemental de l'aviation civile.



## Les simulateurs “full flight” :

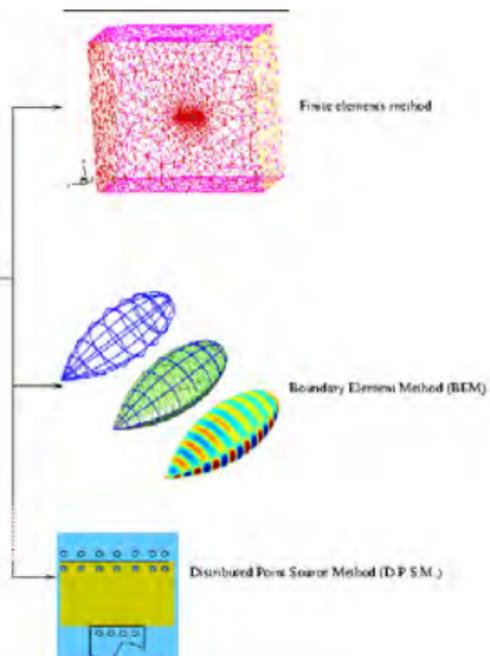
- reproduisent les caractéristiques de pilotage et de comportement,
- permettent d'accélérer la formation, mais aussi de tester/maintenir l'expérience des pilotes,
  - des conditions météo sévères peuvent être sélectionnées par l'instructeur,
  - les exercices peuvent être répétés, enregistrés et analysés pendant des “debriefing”.
- les équipages peuvent également être confrontés à des pannes ou conditions opérationnelles qu'il serait trop hasardeux de pratiquer dans un avion...



## Méthodes de modélisation :



(NASA, 1961)



Des **simulations...**

sont massivement utilisées pendant la **conception des futurs avions** :

- propriétés aérodynamiques,
- calculs et simulations des structures mécaniques (Iron Bird),
- interfaçage avec des systèmes embarqués,
- ...

avec une large utilisation de la **méthode des éléments finis**

Les **modèles de simulation** dans les **simulateurs de vol** sont élaborés principalement à partir de données (Data Package) issues :

- d'enregistrements lors de vols de certification (tables, ...),
- de données produites par calcul lors de la phase de conception (Engineering Data) ,

Les **modèles de simulation** dans les **simulateurs de vol** sont élaborés principalement à partir de données (Data Package) issues :

- d'enregistrements lors de vols de certification (tables, ...),
- de données produites par calcul lors de la phase de conception (Engineering Data) ,

- à partir d'un **modèle physique temps réel**  $\Rightarrow$  c'est l'objectif du **DPSM-Mécanique des fluides**

temps réel voulant dire  $\leq 30$  ms

et **D.P.S.M.** Distributed **P**oint **S**ource **M**ethod

- 1 Introduction
- 2 Principes de la méthode DPSM**
- 3 DPSM et calculs aérodynamiques
- 4 Premiers résultats
- 5 Conclusion

**D.P.S.M.** pour **D**istributed **P**oint **S**ource **M**ethod [D. Placko, 2007]<sup>1</sup>  
initialement développée pour accéder à des modèles 3D en :

- électrostatique,
- électromagnétique,
- et ultrasonique,

afin de résoudre des problèmes CND (Contrôle Non Destructif).

Les caractéristiques principales de la méthode DPSM sont :

- calcul 3D vrai (pas de tronçonnage),
- méthode non itérative,
- méthode précise basée sur l'identification d'interactions physiques (fonctions de Green),
- résultats obtenus sous forme semi-analytique,
- Identification aisée des contributions de chaque élément du problème,

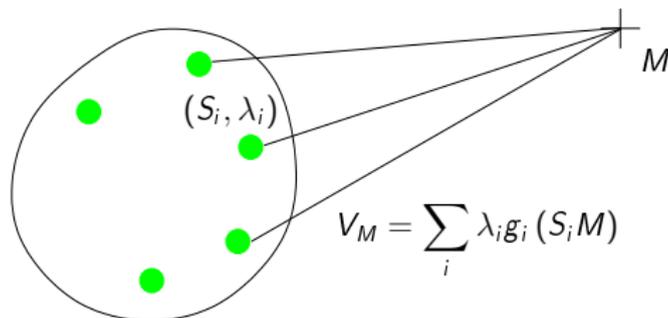
**DPSM-Mécanique des fluides**, extension de DPSM à la méca. des fluides.

---

<sup>1</sup>D. Placko, T. Kundu, *DPSM for modeling engineering problems*, Wiley-Interscience, 2007.

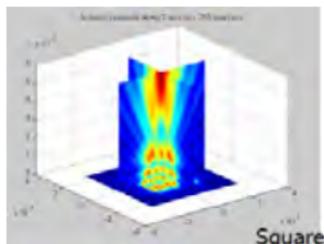
DPSM discrétise les sources actives sous forme d'un ensemble de points sources rayonnants  $\{S_i\}$ .

Suivant le principe de Huygens (superposition des contributions de chaque source discrète), le champ résultant  $V_M$  en un point  $M$  d'intérêt est :

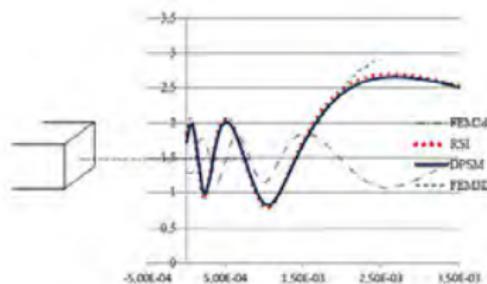


- $g_i(S_i M)$  est une fonction de Green,
- $\lambda_i$  est la contribution de  $S_i$  (valeur scalaire ou complexe qui doit être estimée)

**Exemple 1** : Champ rayonné par un transducteur acoustique :



( $f = 1$  MHz, transduc. size  $L = 2.4$ mm),

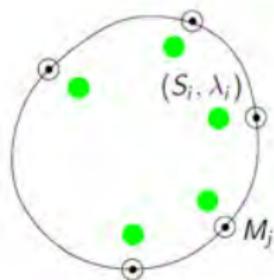


( $f = 5$  MHz,  $L = 1.55$  mm)

Simulation duration: COMSOL (FEM3D) = 35 hours, DPSM = 2 minutes

Points tests et arrangement des blocs sources [T. Bore *et al*, 2014]<sup>2</sup>:

- distribution de points cibles en surface de l'objet : points tests,  $(M_j)$
- calcul de la somme des contributions des sources  $S_i$  en chaque  $M_j$



$$V_{M_j} = \sum_i \lambda_i g(S_i M_j)$$

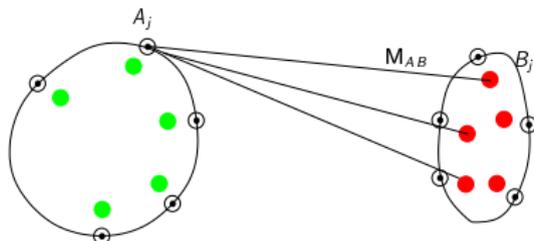
$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} V_{M_1} \\ \vdots \\ V_{M_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{p1} & \cdots & g_{ps} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_s \end{pmatrix} = \mathbf{M}\boldsymbol{\lambda}$$

- $\mathbf{M}$  matrice “d'autocouplage” ,
- $\mathbf{V} \Rightarrow$  Conditions Limites aux interfaces fixées par l'Utilisateur (CLU), ou Intrinsèques (CLI)

Les CLU/CLI permettent d'estimer les valeurs de  $\boldsymbol{\lambda}$  par  $\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{V}$

<sup>2</sup>T. Bore, P.-Y. Joubert, D. Placko, *A differential DPSM based modeling applied to eddy current imaging problems*, PIER, vol. 148, pp 209–221, 2014

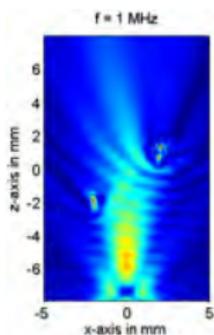
Dans le cas de plusieurs milieux :



$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_A \\ \mathbf{v}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{AA} & \mathbf{M}_{AB} \\ \mathbf{M}_{BA} & \mathbf{M}_{BB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_{S_A} \\ \lambda_{S_B} \end{pmatrix} = \mathbf{M}\lambda$$

avec  $\mathbf{M}_{AB}$  matrice d'intercouplage entre milieux

**Example 2:** bulles d'air dans de l'eau, transducteur ultrasonique circulaire (R=2 mm)



## Du point de vue du traitement du signal :

DPSM : problème inverse (problème inverse et positionnement de sources)  
de la forme :

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}\mathbf{s} + \mathbf{b}$$

- $\mathbf{c}$  regroupe le vecteur conditions aux limites (utilisateurs, intrinsèques aux interfaces, conditions additionnelles, ...)

## Du point de vue du traitement du signal :

DPSM : problème inverse (problème inverse et positionnement de sources)  
de la forme :

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}\mathbf{s} + \mathbf{b}$$

- $\mathbf{c}$  regroupe le vecteur conditions aux limites (utilisateurs, intrinsèques aux interfaces, conditions additionnelles, ...)
- $\mathbf{M}$  matrice globale d'interactions (tenseur); dépend des fonctions de Green et du positionnement géométrique des points,

## Du point de vue du traitement du signal :

DPSM : problème inverse (problème inverse et positionnement de sources)  
de la forme :

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}\mathbf{s} + \mathbf{b}$$

- $\mathbf{c}$  regroupe le vecteur conditions aux limites (utilisateurs, intrinsèques aux interfaces, conditions additionnelles, ...)
- $\mathbf{M}$  matrice globale d'interactions (tenseur); dépend des fonctions de Green et du positionnement géométrique des points,
- $\mathbf{s}$  sources recherchées,

## Du point de vue du traitement du signal :

DPSM : problème inverse (problème inverse et positionnement de sources)  
de la forme :

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}\mathbf{s} + \mathbf{b}$$

- $\mathbf{c}$  regroupe le vecteur conditions aux limites (utilisateurs, intrinsèques aux interfaces, conditions additionnelles, ...)
- $\mathbf{M}$  matrice globale d'interactions (tenseur); dépend des fonctions de Green et du positionnement géométrique des points,
- $\mathbf{s}$  sources recherchées,
- $\mathbf{b}$  bruit additif.

Deux configurations :

- DPSM en mode “analyse” :
  - **c** regroupe conditions physiques et mathématiques,
  - **b** bruit de calcul,  
**Inversion de  $M$**  : **inversion directe** (si le conditionnement le permet),  
par **pseudo-inverse** (fonction du dimensionnement du problème), QR,  
LU, ...

## Deux configurations :

- DPSM en mode “analyse” :
  - **c** regroupe conditions physiques et mathématiques,
  - **b** bruit de calcul,  
**Inversion de  $M$**  : **inversion directe** (si le conditionnement le permet),  
par **pseudo-inverse** (fonction du dimensionnement du problème), QR,  
LU, ...
- DPSM en mode synthèse :
  - **c** regroupe conditions mathématiques mais également des conditions externes (mesures, expérimentations),
  - **b** bruit de mesure et de calcul,  
**Inversion de  $M$**  : **inversion de type Wiener** (plus généralement en suivant approche “régularisée”)

- 1 Introduction
- 2 Principes de la méthode DPSM
- 3 DPSM et calculs aérodynamiques**
- 4 Premiers résultats
- 5 Conclusion

# Analogies entre l'électrostatique, l'électromagnétisme et la mécanique des fluides :

## Electrostatique:

le champ électrique  $\vec{E}$  et le potentiel  $P$  verifient l'équation de Poisson :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\Delta P = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\text{with } \vec{E} = -\vec{\nabla} P$$

The solution for a point source:

Electric field

$$\vec{E} = \frac{q \cdot \vec{ST}}{4\pi\epsilon \|\vec{ST}\|^3}$$

Potential

$$P = \frac{q}{4\pi\epsilon \|\vec{ST}\|}$$

(Source)



S

$\vec{E}$



T

Mécanique des fluides : équation de Navier-Stokes, sous l'hypothèse d'un fluide incompressible :  $\text{div}(\vec{V}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$

- Fluide irrotationnel  $\text{rot}(\vec{V}) = \vec{\nabla} \times \vec{V} = \vec{0}$  (rotationnel de  $\vec{V}$  est nul)  
l'écoulement dérive d'un potentiel scalaire :  $\vec{V} = -\vec{\nabla}\theta = -\text{grad}(\theta)$ ,  
par analogie avec l'électrostatique :

Electrostatique	Mécanique des Fluides
$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \Delta P = -\frac{\rho}{\epsilon}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \Delta \theta = 0$

$$\vec{V} = \frac{\lambda_s \cdot \vec{ST}}{4\pi\epsilon \|\vec{ST}\|^3} \text{ et } P = \frac{\lambda_s}{4\pi\epsilon \|\vec{ST}\|} \text{ les sources émettent un champ radial}$$

$$\vec{V} = -\vec{\nabla}\theta \text{ la vitesse } [m \cdot s^{-1}],$$

$\theta$  le potentiel scalaire  $[m^2 \cdot s^{-1}]$ ,  $\int \vec{V} \cdot d\vec{l} = \theta$ ,  $\lambda_s$  in  $[m^3 \cdot s^{-1}]$ ,  $\rho$  la densité  $[Kg \cdot m^{-3}]$

⇒ paradoxe de D'Alembert

- Fluide rotationnel  $\text{rot}(\vec{V}) = \vec{\nabla} \times \vec{V} \neq \vec{0}$

il y a des sources vortex  $\vec{\omega} = \text{rot}(\vec{V}) = \vec{\nabla} \times \vec{V}$  et l'écoulement dérive d'un potentiel vecteur,

*i.e.*  $\vec{V} = -\vec{\nabla} \times \vec{A}$  (analogie avec l'électromagnétisme : *Biot et Savart*),  
 $\Rightarrow$  les sources émettent un flux transverse (partie rotationnelle)

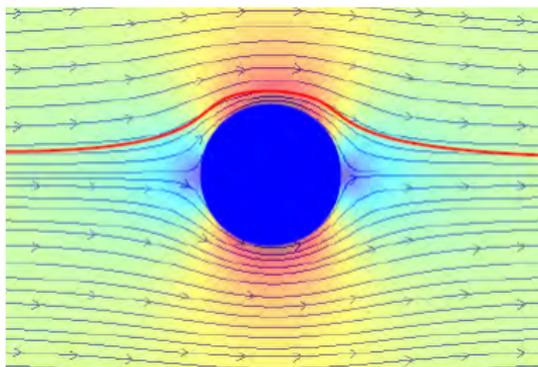
La décomposition de Helmholtz-Hodge est satisfaite :  $\vec{V} = -\vec{\nabla}\theta + \vec{\nabla} \times \vec{A}$

- 1 Introduction
- 2 Principes de la méthode DPSM
- 3 DPSM et calculs aérodynamiques
- 4 Premiers résultats**
- 5 Conclusion

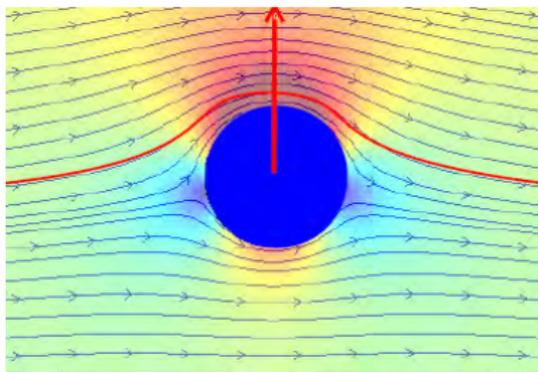
## Un cylindre dans un écoulement

- solutions connues (solutions analytiques),
- conditions limites simples à exprimer :
  - entrée et sortie de la soufflerie,
  - la composante normale est nulle à la surface,

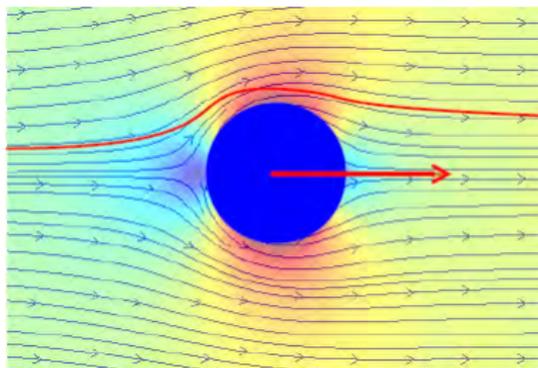
## Paradoxe de D'Alembert



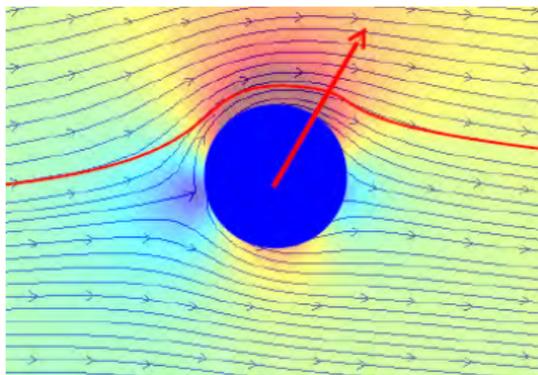
## Effet Magnus

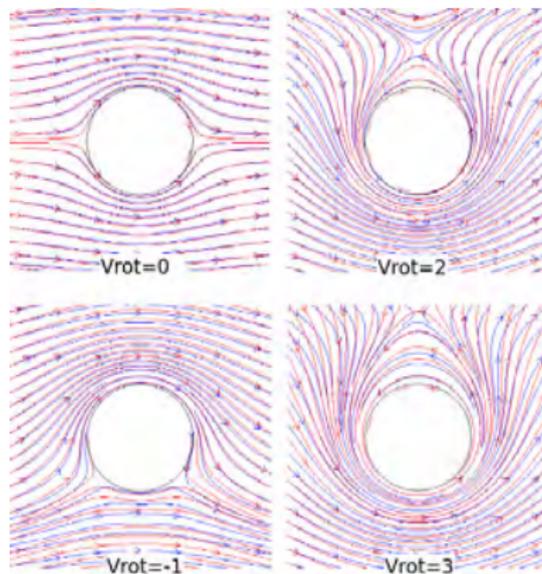


## Trainée



## Trainée et effet Magnus

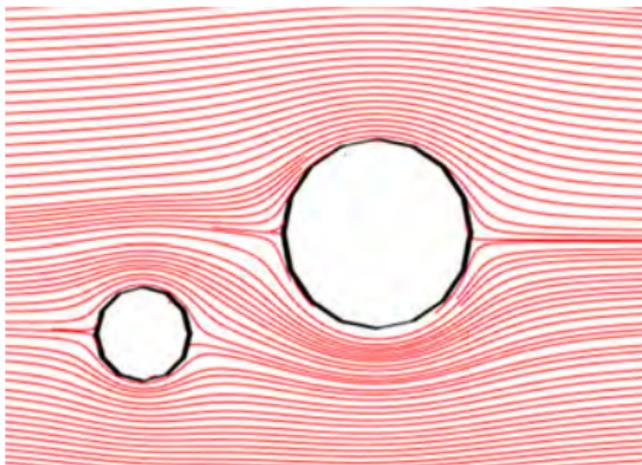




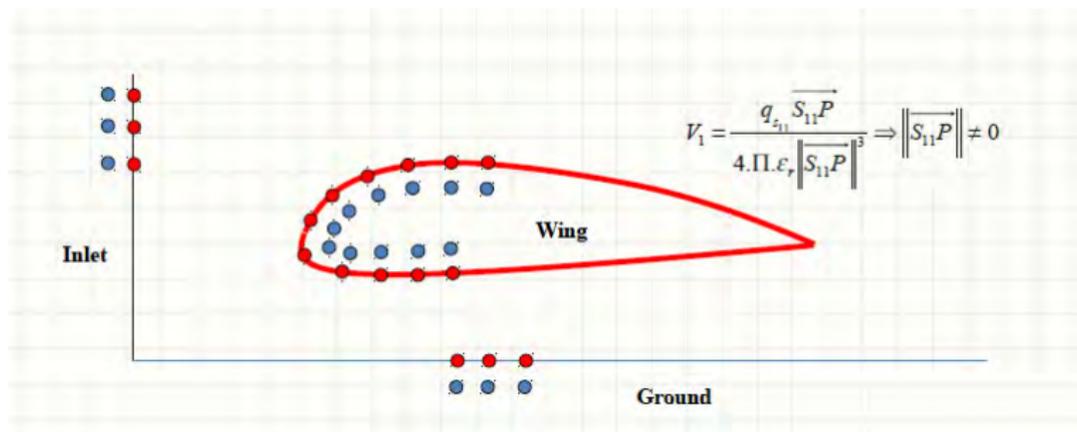
Lignes bleu : DPSM,

Lignes rouge : résultat analytique

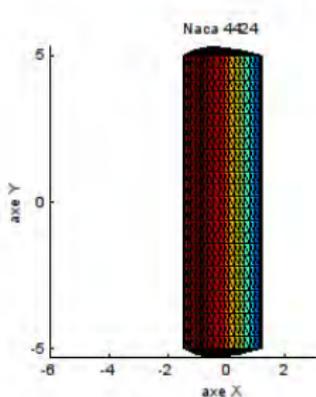
# Interaction entre deux solides dans un écoulement :



- Lignes de champ obtenues par calcul DPSM



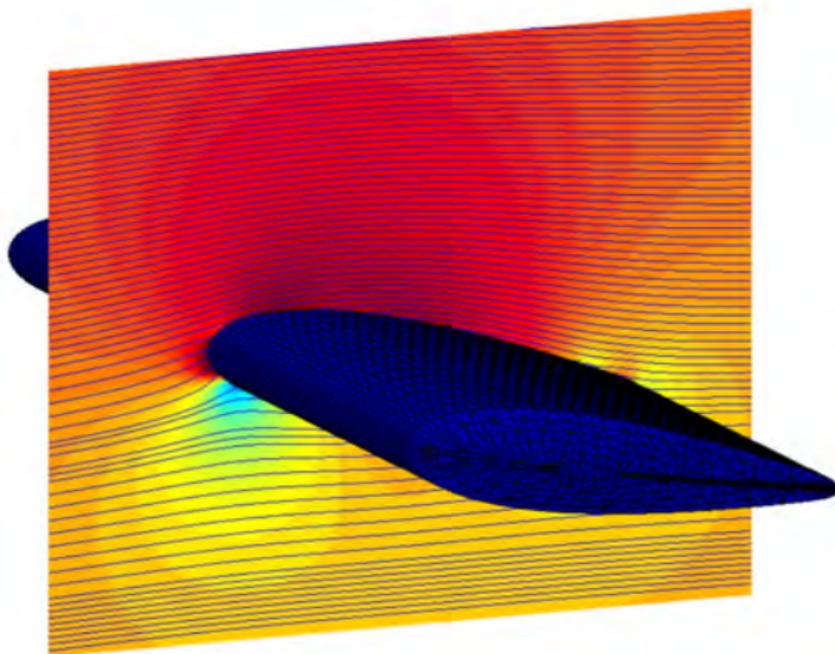
# Application à l'aile d'avion: données de Géométrie: profil NACA 4424



Envergure = 10m  
Corde = 3m

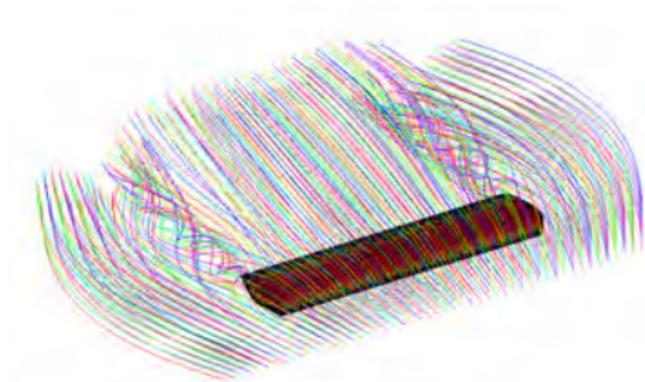


# Application à l'aile d'avion isolée :



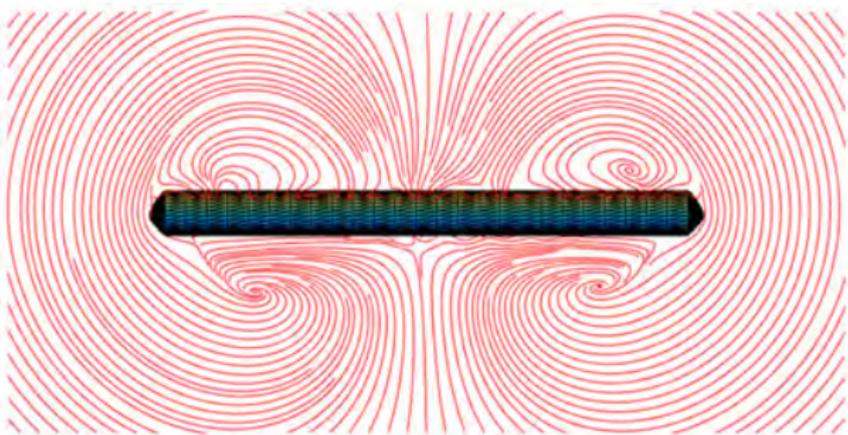
Incidence 10 deg., lignes d'écoulement et vitesses.

## Application à l'aile d'avion isolée (3D)



Lignes d'écoulement (vue 3D) avec mise en évidence des tourbillons marginaux.

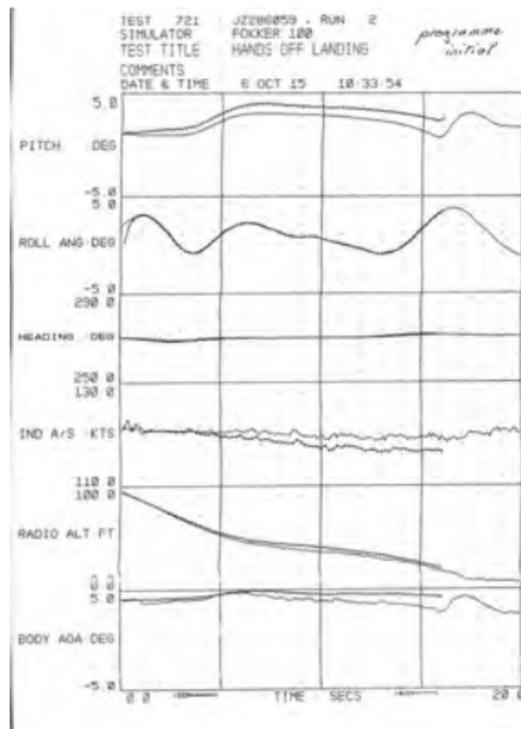
# Aile isolée : calcul des tourbillons marginaux NACA 4424



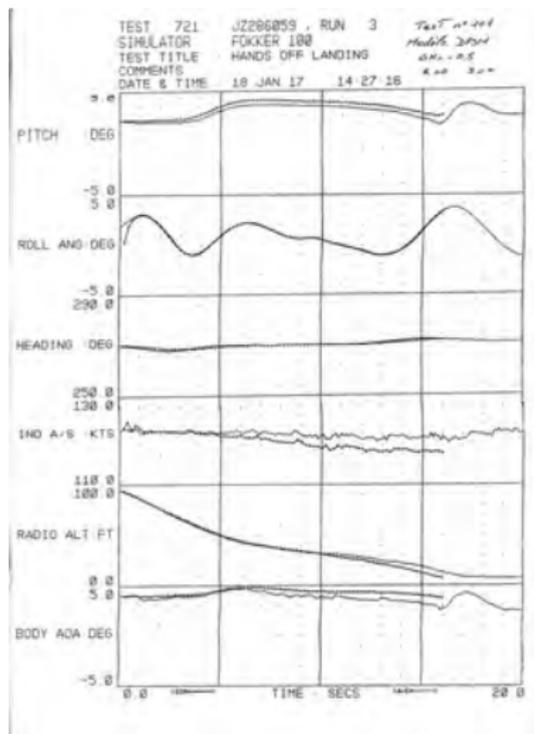
## Fokker 100 :



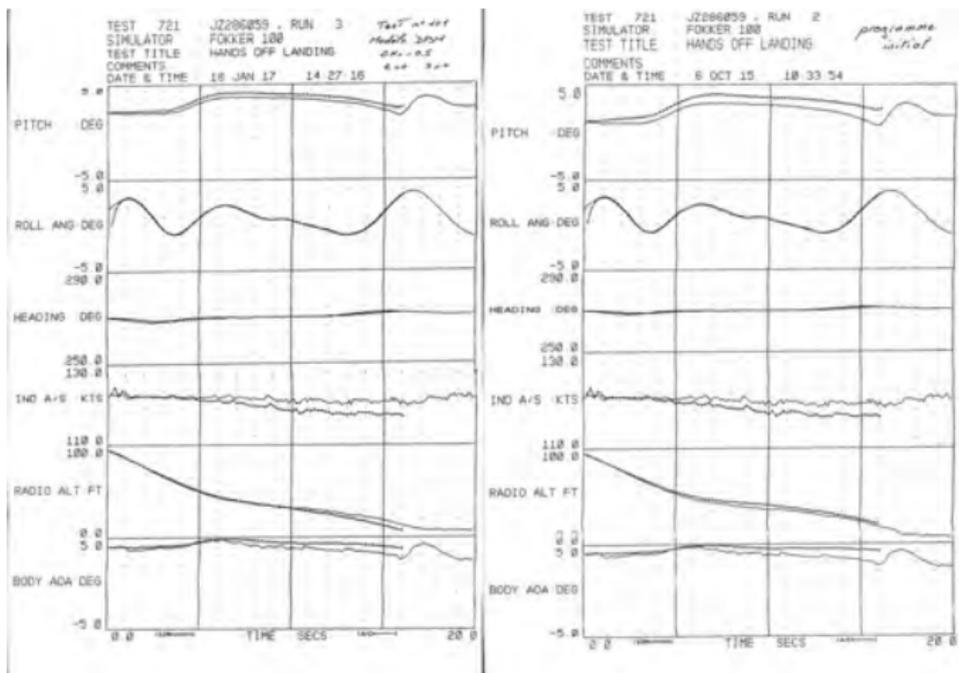
# Tests sur un avion isolé : Fokker 100 (test QTG-Initial)



# Tests sur un avion isolé : Fokker 100 (test QTG-DPSM)



# Tests sur un avion isolé : Fokker 100 (test QTG-DPSM-Initial)



- 1 Introduction
- 2 Principes de la méthode DPSM
- 3 DPSM et calculs aérodynamiques
- 4 Premiers résultats
- 5 Conclusion**

## La méthode DPSM-Mécanique des fluides :

- est une technique **full 3D**,
- methode **non-iterative**,
- **légère** (*i.e.* faible complexité) à implémenter,
- **sparse**: *i.e.* minimise le critère

$$C = \sum_i \left\| \vec{V}_i - \left( \vec{V}_i \right)_{DPSM} \right\|_{\ell_2}^2 + \lambda \cdot \sum_i \|S_i\|_{\ell_0}$$

- **modèle physique** et **predictif** (pas modèle descriptif ou statistique)
- $\rightsquigarrow$  peut permettre d'introduire de la physique temps-réel dans un simulateur de vol (expérimentation en cours)

## Projets :

- projet FARMAN : DPSM-Mécaflu (en cours)
- projet RAPID (déposé)