Vers une optimisation bidisciplinaire par gradient d’une forme d’avion avec une méthode d’optique physique

Charles Thoulon[1]

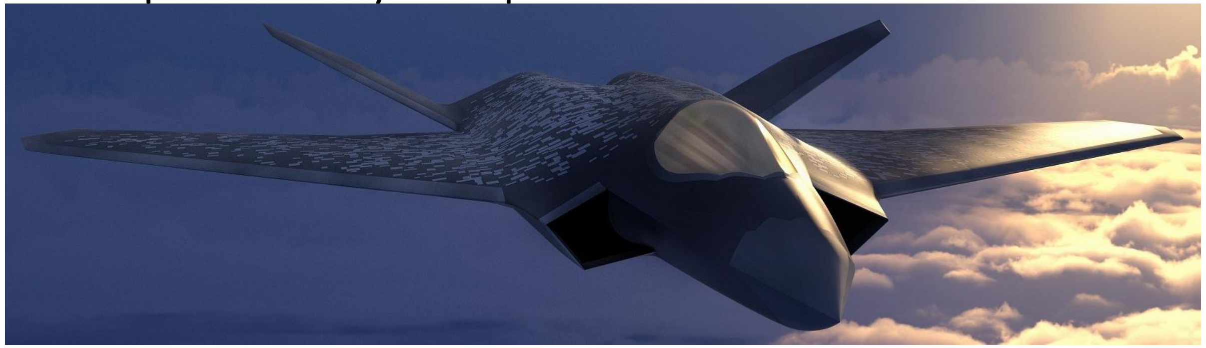
LJLL & Dassault Aviation, thèse de doctorat (1ère année)

Encadrement : Gilbert Rogé (Dassault Aviation), Olivier Pironneau (LJLL)

[1] charles.thoulon@dassault-aviation.com

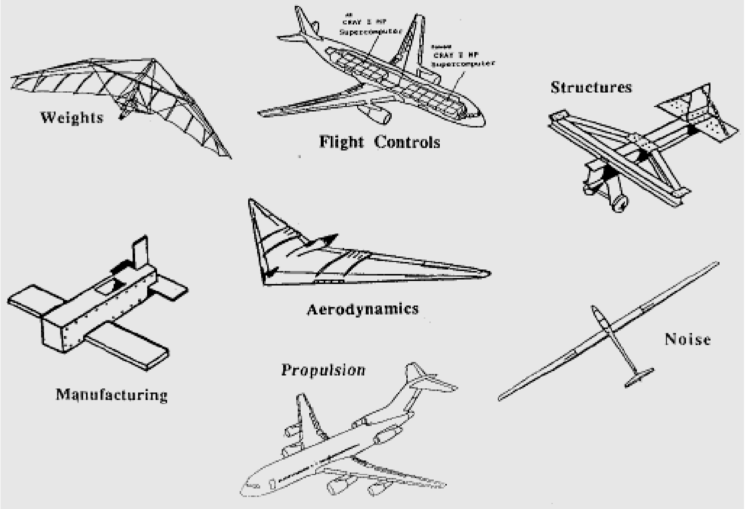
Objectifs

Concevoir un avion performant sur les plans aérodynamique et furtivité.



Une petite modification sur une forme optimisée pour l'aérodynamique peut entrainer une lourde perte de performances. Idem pour la furtivité

- ➢ Nécessité d'intégrer les processus d'optimisation des différentes disciplines en boucle fermée.



Electro-Magnétisme : Les Equations Maxwell

Les équations de Maxwell : $$\left\{ \begin{array}{rcl} \nabla \cdot D & = & \rho, \\ \nabla \cdot B & = & 0, \\ \nabla \times E & = & -\frac{\partial B}{\partial t}, \\ \nabla \times H & = & J + \frac{\partial D}{\partial t}. \end{array} \right.$$

Et une équation de continuité : $$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

- **E** le champ électrique
- **B** le champ magnétique
- **J** le champ de densité de courant électrique
- ρ la densité de charges
- $D = \epsilon_0 E$ (dans le vide)
- $B = \mu_0 H$ (dans le vide)

➢ On se place dans le cas d'un domaine fini conducteur parfait (la cible) au milieu d'un domaine de propagation infini assimilé au vide.

➢ J est **nul partout sauf à la surface de la cible** (hypothèse conducteur parfait).

Surface équivalente RADAR (SER) : $$\sigma = \lim_{R \to \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_P|^2}{|E|^2}$$

E Champ électrique incident

E_P Champ électrique calculé en un point P

R Distance de P à l'origine

Electro-Magnétisme : Formulation intégrale des équations de Maxwell

Les équations de Maxwell peuvent être réécrites avec une formulation intégrale ne dépendant que des conditions aux frontières du domaine (Formulation Intégrale en champ Electrique (EFIE)) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{trouver } \mathbf{J} \in X^h, \forall \mathbf{J}' \in X^h, \\ \int_\Gamma \int_\Gamma G(x,y) \left(-\frac{1}{k^2} \nabla_\Gamma \cdot \mathbf{J}(y) \nabla_\Gamma \cdot \mathbf{J}'(x) + \mathbf{J}(y) \cdot \mathbf{J}'(x) \right) d\Gamma(y) d\Gamma(x) = -\frac{1}{ikZ} \int_\Gamma \mathbf{E}^{\mathrm{inc}} \cdot \mathbf{J}' \, d\Gamma \end{array} \right.$$

Où G est un noyau de Green en 3D

$$G(x,y) := \frac{e^{ik|x-y|}}{4\pi|x-y|}, \text{ pour } x \neq y$$

Une fois discrétisé avec des éléments finis $H_{\mathrm{div}}(\Gamma)$; la formulation intégrale peut être écrite comme un système linéaire :

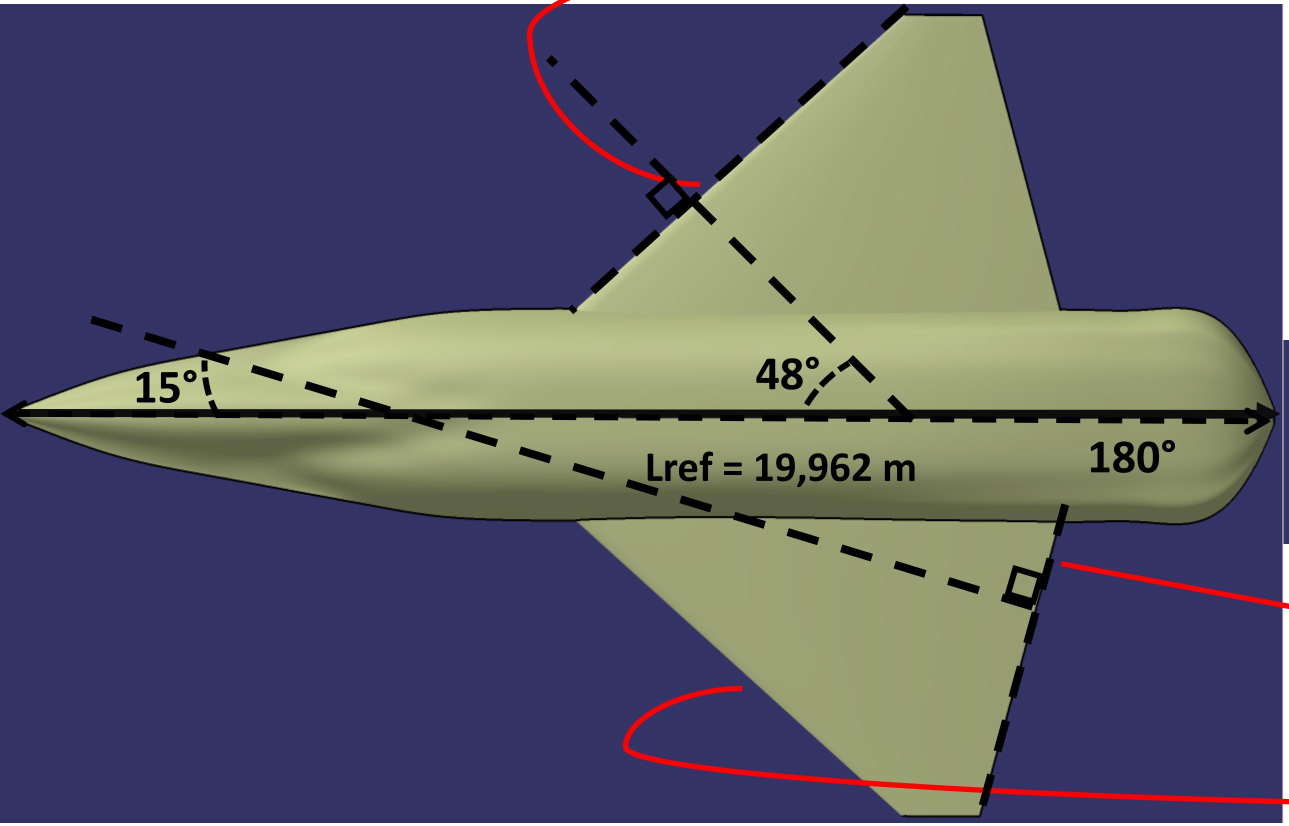
$$[Z][J] = [U]$$

Où [Z] est une matrice de taille NxN, avec N le nombre de barres du maillage.

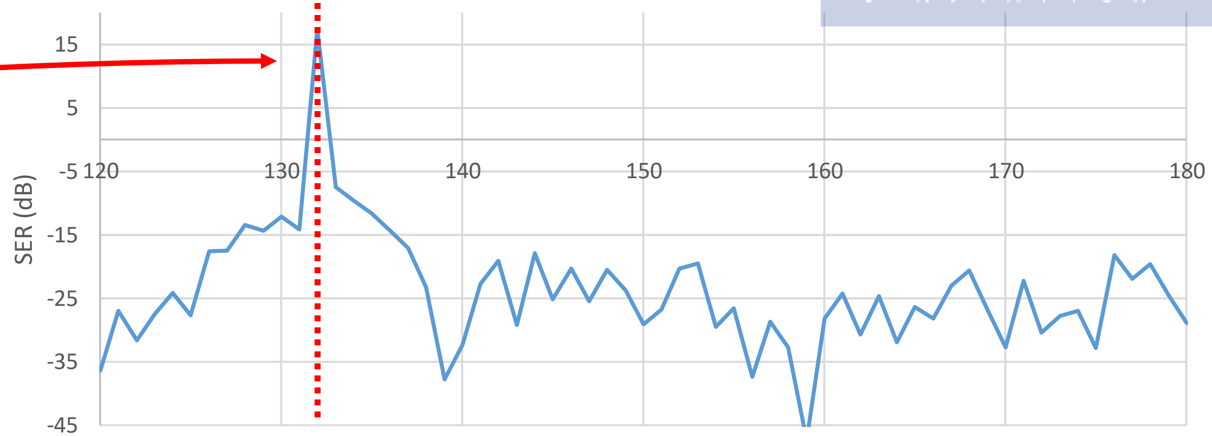
Jean-Claude Nédélec AMS 2001

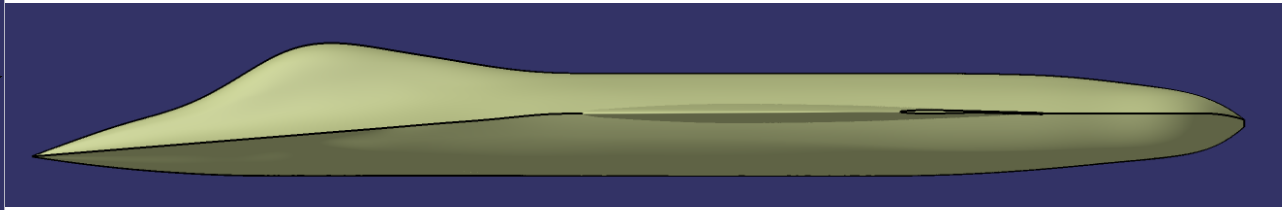
Electro-Magnétisme : SER calculée par BEM (code SPECTRE)

$$ka = \frac{2\pi f L_{ref}}{c} = 1657$$

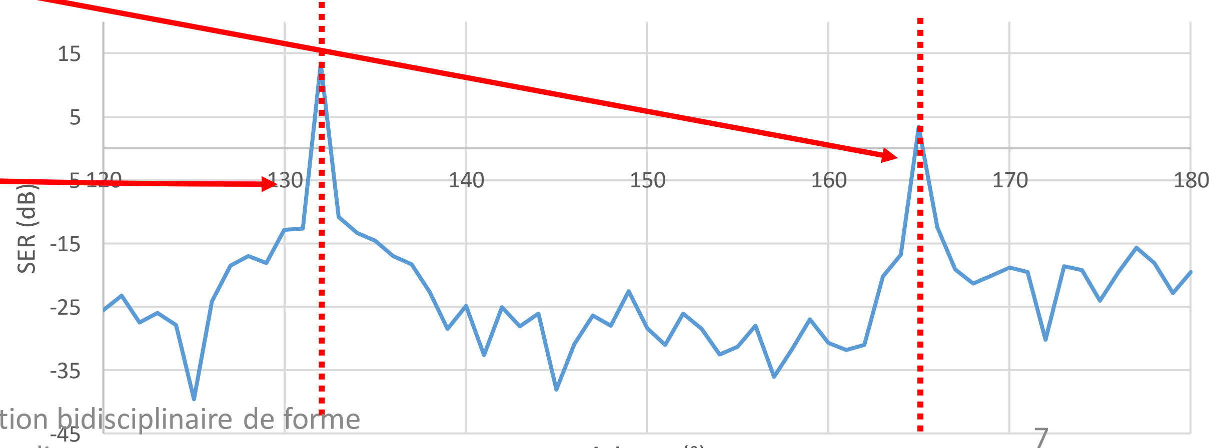


Comparaison pour 4 GHz, polar H et site = -10°





Comparaison pour 4GHz, polar V et site = -10°



On ne remarque pas de pic correspondant aux arêtiers. Parce qu'on n'observe pas dans la bonne direction

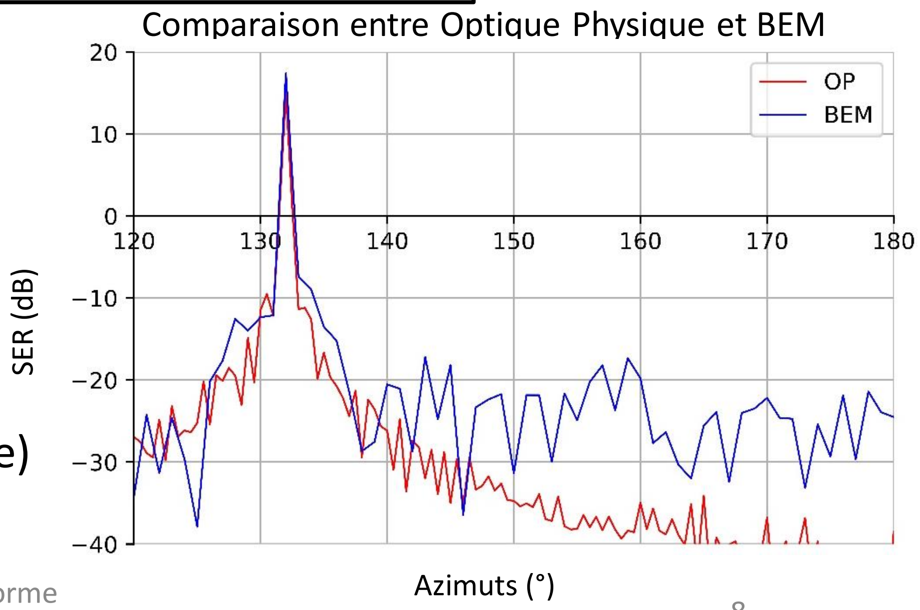
Electro-Magnétisme : Méthode Approchée

- **Optique Physique**
  - Taille de la cible >> longueur d'onde
  - Distance cible - point d'observation >> taille de la cible
    - ➢ Le champ réfléchi est approximé en une **onde localement plane**
  - La cible est maillée
  - Pas d'intéraction entre deux éléments du maillage deux à deux
    - ➢ Le champ réfléchi total est **la superposition** des champs réfléchis par chaque élément du maillage isolé
  - La densité de courant à la surface est nulle là ou la cible n'est pas illuminée

Champ électrique rayonné en P :

$$\boxed{E_P = -\frac{2jk}{4\pi R} e^{-jkR} \int_{S^+} n \times (k \times E) e^{2jk \cdot x(s)} \mathrm{d}s}$$

E	Champ électrique incident
R	Distance de P à l'origine
k	Vecteur d'onde
S^+	surface de la cible
n	Normale à la surface
$x(s)$	Position de l'élément infinitésimal de surface



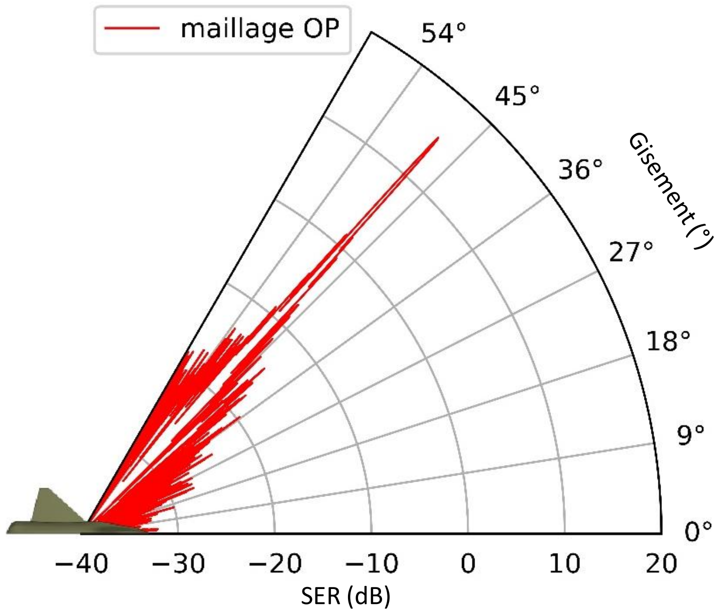
- **Théorie Physique de la Diffraction** (extension de l'OP pour la diffraction d'arête)

Daniel Bouche
Mathapplic 1994

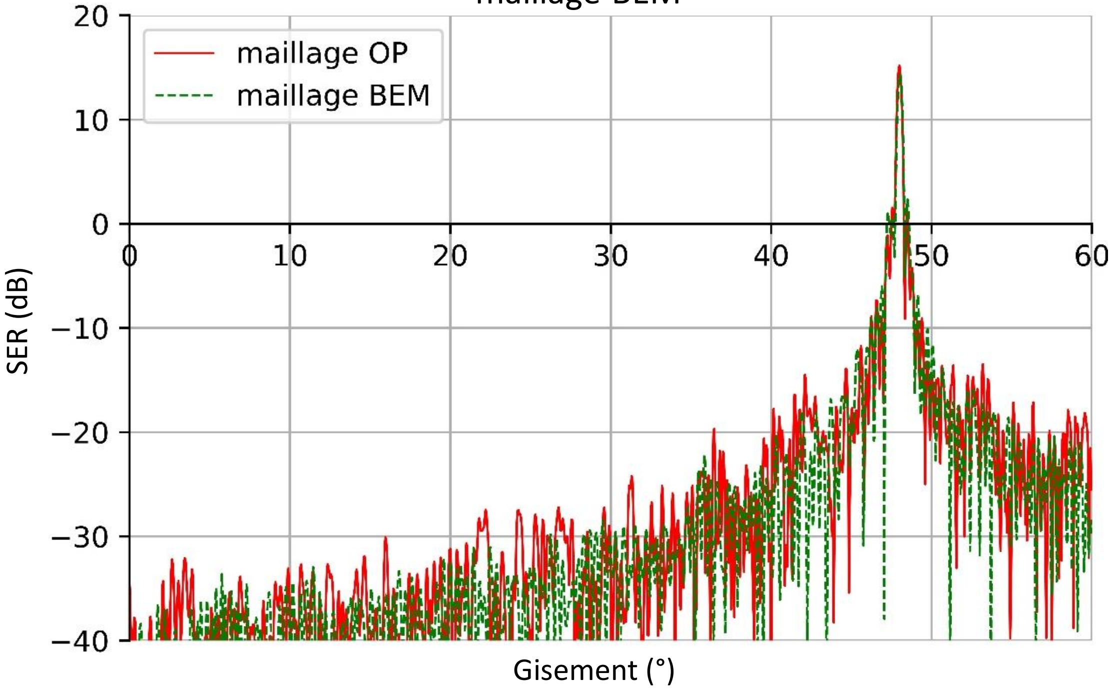
Electro-Magnétisme : L'Optique Physique

Surface équivalente RADAR (SER) : $$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{|E_P|^2}{|E|^2}$$

Résultat d'un calcul d'optique physique



Comparaison entre un calcul OP sur maillage adapté et sur le maillage BEM



Comparaison du temps de calcul entre la méthode BEM sur maillage de référence et la méthode OP sur le maillage de référence BEM et un maillage adapté à l'optique physique

maillage	nb éléments	Temps BEM / temps OP
Maillage 15mm (BEM)	2 432 568	2.11
Maillage 20-120 (OP)	52 416	204.67

Electro-Magnétisme : Calcul du gradient de forme de l'optique physique

Gradient théorique de la SER par rapport à la normale de la surface

$$\sigma'_\alpha = \frac{2k^2}{\pi}\mathcal{R}_e\left(\overline{\left(\int_{S^+} E\cdot n\mathrm{e}^{2jk|x|}\mathrm{d}s\right)}E\cdot n\left(\frac{n\cdot x}{|x|}2jk-\frac{1}{R}\right)\mathrm{e}^{2jk|x|}\right)$$

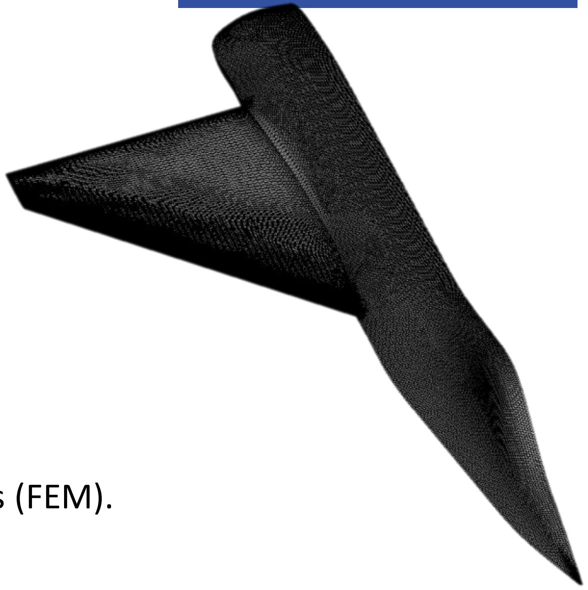
Gradient calculé en mode reverse (Différentiation par rapport à un grand nombre de paramètres).

Différentiation : code TAPENADE (INRIA).

Laurent Hascoet
Anesthesiology
2004

Aérodynamique : Equations de Navier-Stokes

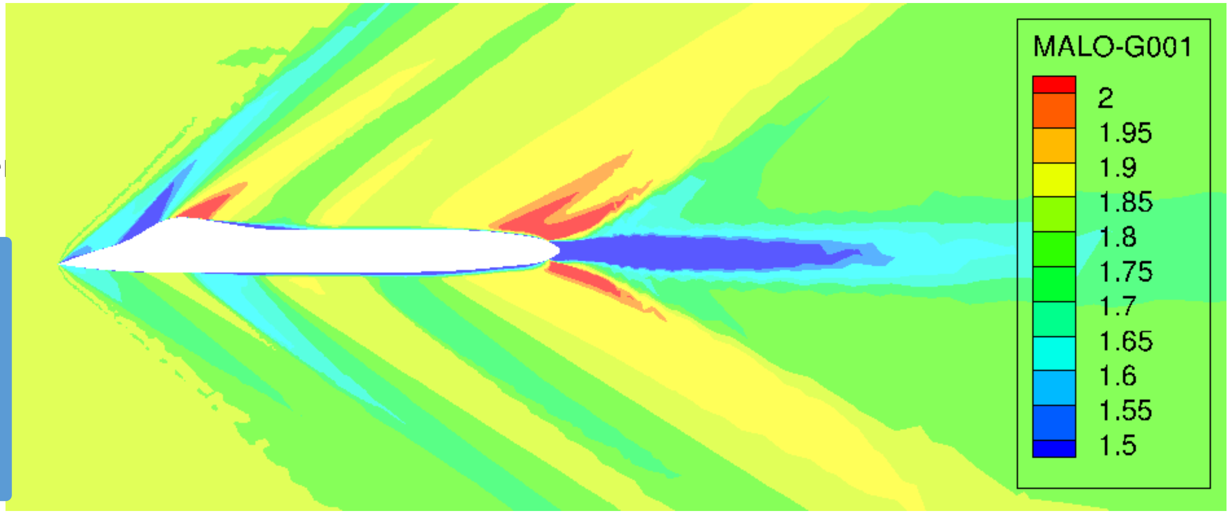
Une forme des équations de Navier-Stokes
$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0, \\ \dfrac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \otimes u) - \nabla \cdot \sigma = 0, \\ \dfrac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e u) - \nabla \cdot (\sigma u) + \nabla \cdot q = 0 \end{cases}$$



$$\text{avec :} \begin{cases} \sigma = -pI + \tau \;,\; \tau = \lambda \mathrm{Tr}(\Delta) I + 2\mu\Delta \;,\; \Delta = \frac{1}{2}\left[\nabla u + (\nabla u)^t\right] \\ e = \epsilon + \frac{1}{2}|u|^2 \;,\; \epsilon = c_V T \;,\; p = \rho R T \;,\; q = -\kappa \nabla T \end{cases}$$

Computational Fluid Dynamics (CFD) : En gnl, résolution par Méthode des Volumes Finis (FVM), ou Méthode des Eléments Finis (FEM).
Ici : Méthode des Eléments Finis
La résolution directe (Direct Numerical Simulation) n'est pas utilisée en pratique pour des applications industrielles.

- **Zonal Detached Eddy Simulation (ZDES)**
  - Instationnaire
  - Les plus hautes échelles de la turbulence sont résolues directement (écoule
  - Les échelles les plus petites sont modélisées
- **Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)**
  - Les équations de NS sont moyennée en utilisant la moyenne statistique.
  - Seul le champ moyen est résolu
  - La turbulence est entièrement modélisée
  - Simulation stationnaire ou périodique



Profil de nombre de Mach dans le plan de symétrie du GFA (RANS) code AETHER

Frédéric Chalot
ECM 2004

Aérodynamique : Calcul du gradient aerodynamique (formulation adjointe)

E Non linear system for fluid (Euler or Navier-Stokes)

L Linear system for mesh deformation

W State, solution of E

X Volume coordinates

x Surface coordinates

J Observation

λ Aerodynamic parameters

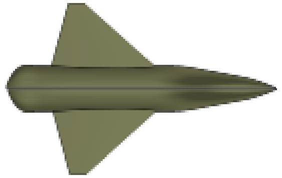
ν Geometric parameters

ψ Fluid Adjoint, solution of $\psi^T \frac{\partial E}{\partial W} = \frac{\partial J}{\partial W}$

ϕ Mesh Adjoint, solution of $\phi^T \frac{\partial L}{\partial X} = \frac{\partial J}{\partial X} - \psi^T \frac{\partial E}{\partial X}$

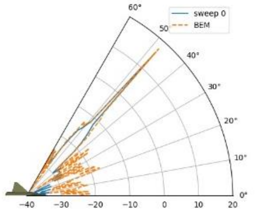
$$\boxed{\begin{aligned} \frac{dJ}{d\lambda} &= \frac{\partial J}{\partial \lambda} - \psi^T \frac{\partial E}{\partial \lambda} \\ \frac{dJ}{d\upsilon} &= -\phi^T \frac{\partial L}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \upsilon} \end{aligned}}$$

Jacques-Louis Lions
Dunod 1968



Modeleur de forme paramétrée

T ≈ 1min



Optimiseur

Fonction coût,
Contraintes,
Gradients

T =10s

Optimisation Automatique de Forme

Analyse

Expertise des experts aérodynamique, électromagnétisme
(Global vision)

Maillages

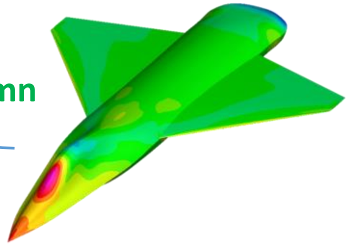
Surface
Volume

T=2min (déformation)

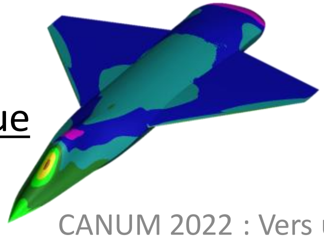
Solveur Aérodynamique

Navier-Stokes :

T = 10mn



Output: Final Shape



Solveur Electromagnétique

Optique Physique

T = 2mn

Gilbert Roge *et al.* ECOMAS-CM3 2021

Optimisation : Modelage de forme (code GANIMEDE)

Géométrie représentée par des NURBS

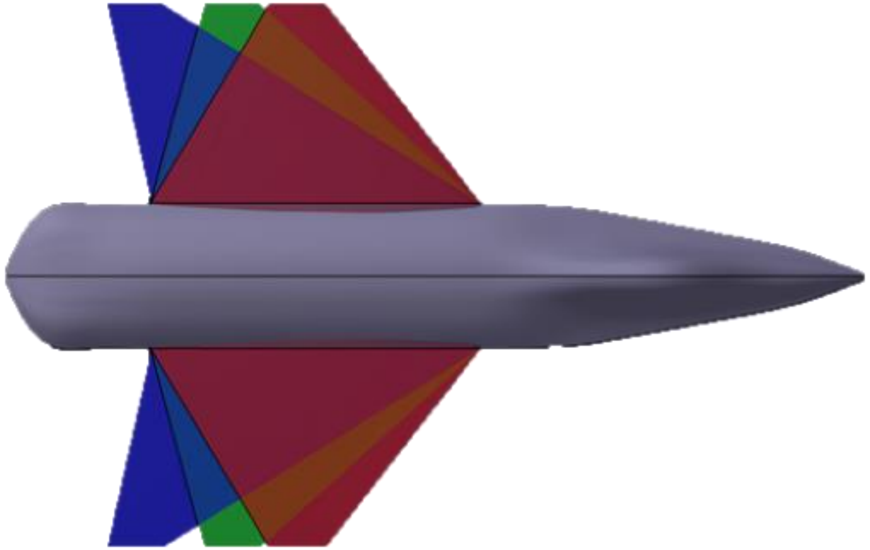
Utilisation d’un modeleur CAO pour déformer la géométrie 2D : opérateur RBF (Radial Basis Function)

Reprojection du maillage 2D sur la surface

Déformation du maillage 3D (si nécessaire) : opérateur elliptique

Steven Kleinveld *et al.*
AIAA 2008

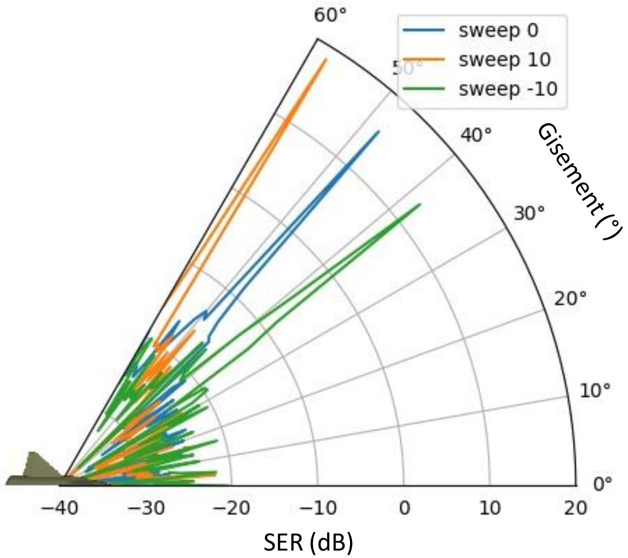
Optimisation : Paramètre de forme (code GANIMEDE) : angle de flèche du bord d'attaque (sweep)



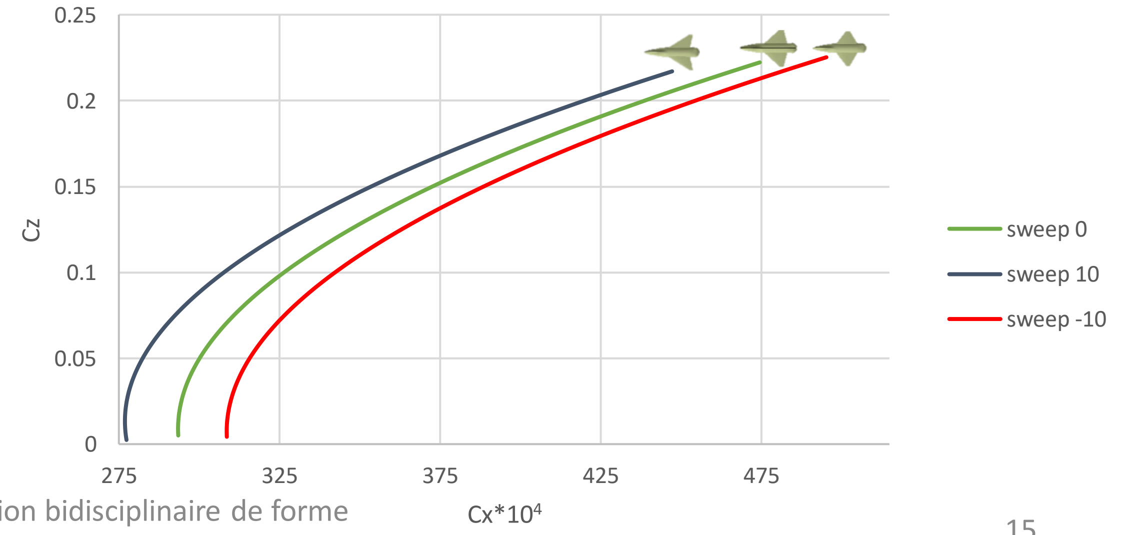
Géométrie	Flèche de bord d'attaque	Flèche de bord de fuite
Base	48°	-15°
Flèche -10°	38°	-31°
Flèche +10°	58°	12,5°

Cz = 0.0933				Cz = 0.0093			
Fleche	Cx	Delta Cx	Delta Cx (%)	Fleche	Cx (pression)	Delta Cx	Delta Cx (%)
-10	311.7	15.2	5.1	-10	262.19	15.5	6.29
0	296.5	0.0	0.0	0	246.68	0.0	0.00
10	279.7	-16.8	-5.7	10	229.97	-16.7	-6.77

Profil de SER en fonction du gisement pour différentes formes

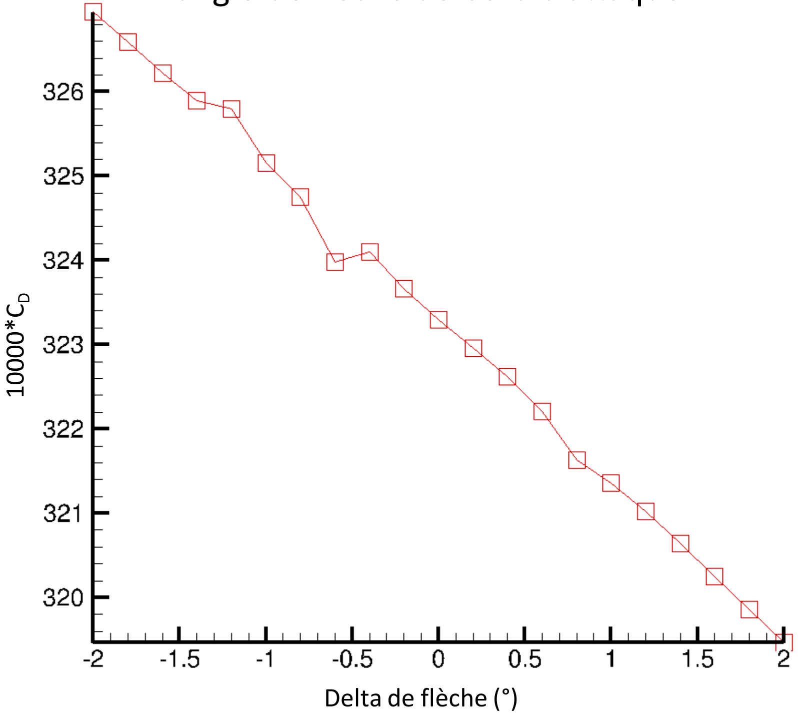


Polaires Cx-Cz pour les différentes formes (maillage conception) Mach = 1,8 incidence = 2°



Optimisation : Choix de la fonction objectif pour l'aérodynamique

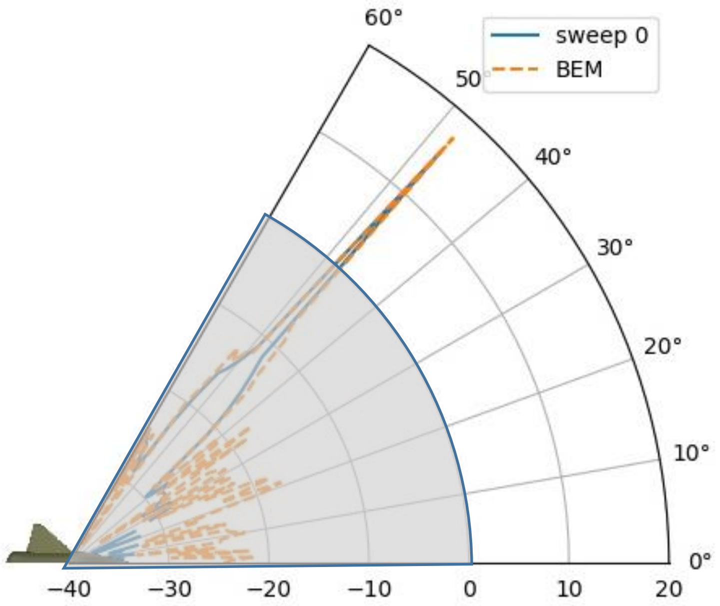
Evolution de la traînée aérodynamique avec l'angle de flèche de bord d'attaque



Fonction objectif : la traînée aérodynamique : $f_{obj} = 10000 * C_D$

Contrainte : La portance ne peut pas diminuer : $C_L \geq C_{L_{init}}$

Optimisation : Choix de la fonction objectif pour l'électro-magnétisme



Fonction objectif (exemples) : Intégrale avec seuil (0 dB) pondérée par la direction en gisement
une forte SER est d'autant plus pénalisante qu'elle est dans l'axe de l'avion)

$$f_{obj} = \int_\Gamma (1-2\theta/\pi)^2 max(\delta, SER_{dB}) \mathrm{d}\mathcal{S}$$

Γ Surface de la partie de la sphère infinie balayée par l'observation

δ Seuil arbitraire fixé à 0 dB

θ Angle de gisement

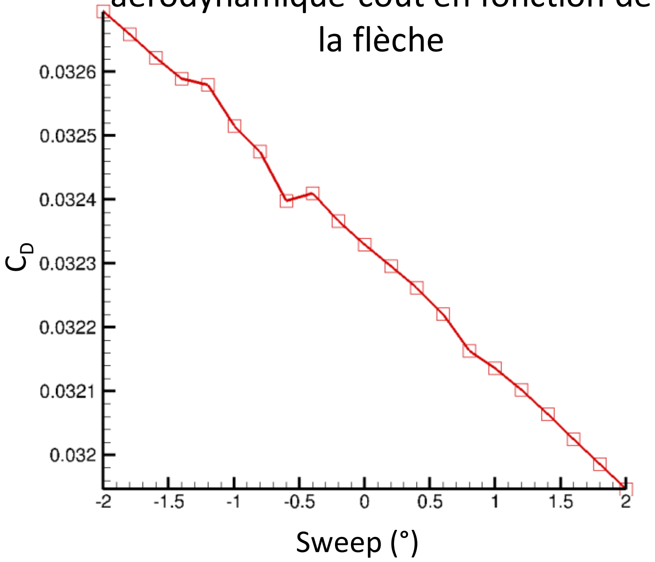
Autres fonctions coûts possibles :

- Moyenne pondérée de la SER
- Surface de la zone où la SER est supérieure au seuil

Optimisation : Balayage mono-disciplinaire à un paramètre (sweep)

- Sweep de -2° à 2° avec un pas de 0,2°

Evolution de la traînée aérodynamique coût en fonction de la flèche

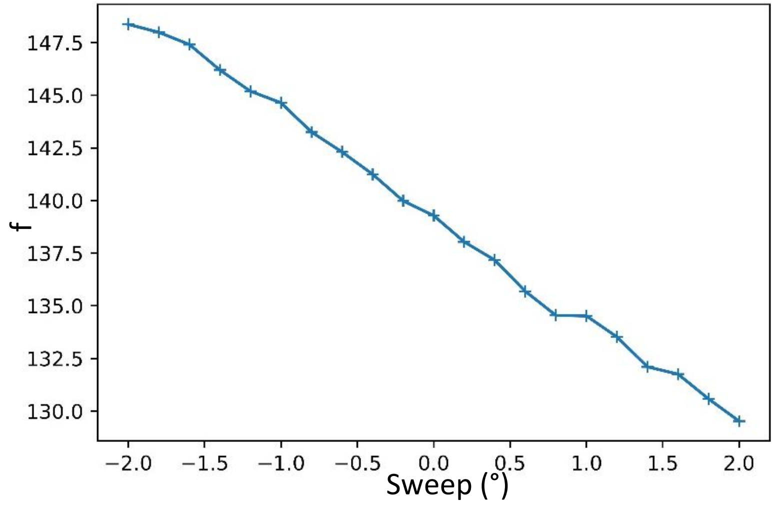


- Les deux objectifs ne sont pas concurrents
  - ➢ Bon d'un point de vue design, mais pas bon pour démontrer la capacité de notre méthode à trouver un compromis

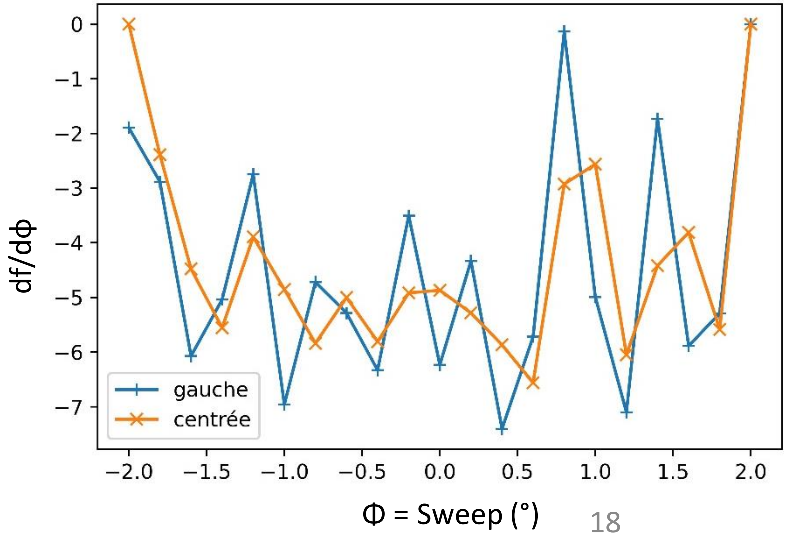
- Les fonctions objectifs sont monotones

- Le gradient de la fonction coût furtivité n'est pas régulier
  - ➢ Pas bon pour une optimisation avec plusieurs variables

Evolution de la fonction coût en fonction de la flèche



Dérivée (par différence finie) de la fonction coût en fonction de la flèche



Conclusions :

- Une méthode de calcul de la RCS d’un aeronef approchée pour les hautes fréquences a été décrite et implémentée
- La différenciation de cette méthode par rapport aux paramètres de déformation est en cours
- Une étude de l’évolution de la SER par rapport à l’angle de flèche du bord d’attaque a mené au choix d’une fonction coût

Perspectives :

- Ajout et différenciation du calcul de la diffraction d’arêtes (PTD)
- Optimisation aérodynamique-furtivité (Li, *Aerospace Science and Technology* 2019)
- Détermination et implémentation du gradient de la BEM (Nikolova, *IEEE* 2004)
- Mise en place de méthodologies de d’optimisation multi-précision PO-BEM (Laffont, PhD 2022)
- Calcul de surfaces de réponses avec gradient aero-stealth (de type RBF)