



MÉTHODES DE MESURE EN AÉRODYNAMIQUE

Partie 1 Mesure des efforts

Jean Déleroy

Conseiller émérite à l'Onera

jean.delery@free.fr

Jean-François Bret

Jean-Philippe Vieira

Direction Réseau

Ingénierie Maquettes

Méthodes de mesure en aérodynamique

Partie 1

Mesures des efforts

De Havilland *Mosquito*



Méthodes de mesure en aérodynamique



**Rappels sur les effort
aérodynamiques**

Efforts aérodynamiques

➔ résultante des **actions de contact** de l'écoulement (pression et frottement) sur le véhicule en mouvement

★ force aérodynamique \vec{F}

★ point d'application de \vec{F} ou centre de poussée C

problème ➔

connaître \vec{F} et le point d'application C

mouvement de l'avion déterminé par transport de \vec{F} au centre de gravité G

données équivalente

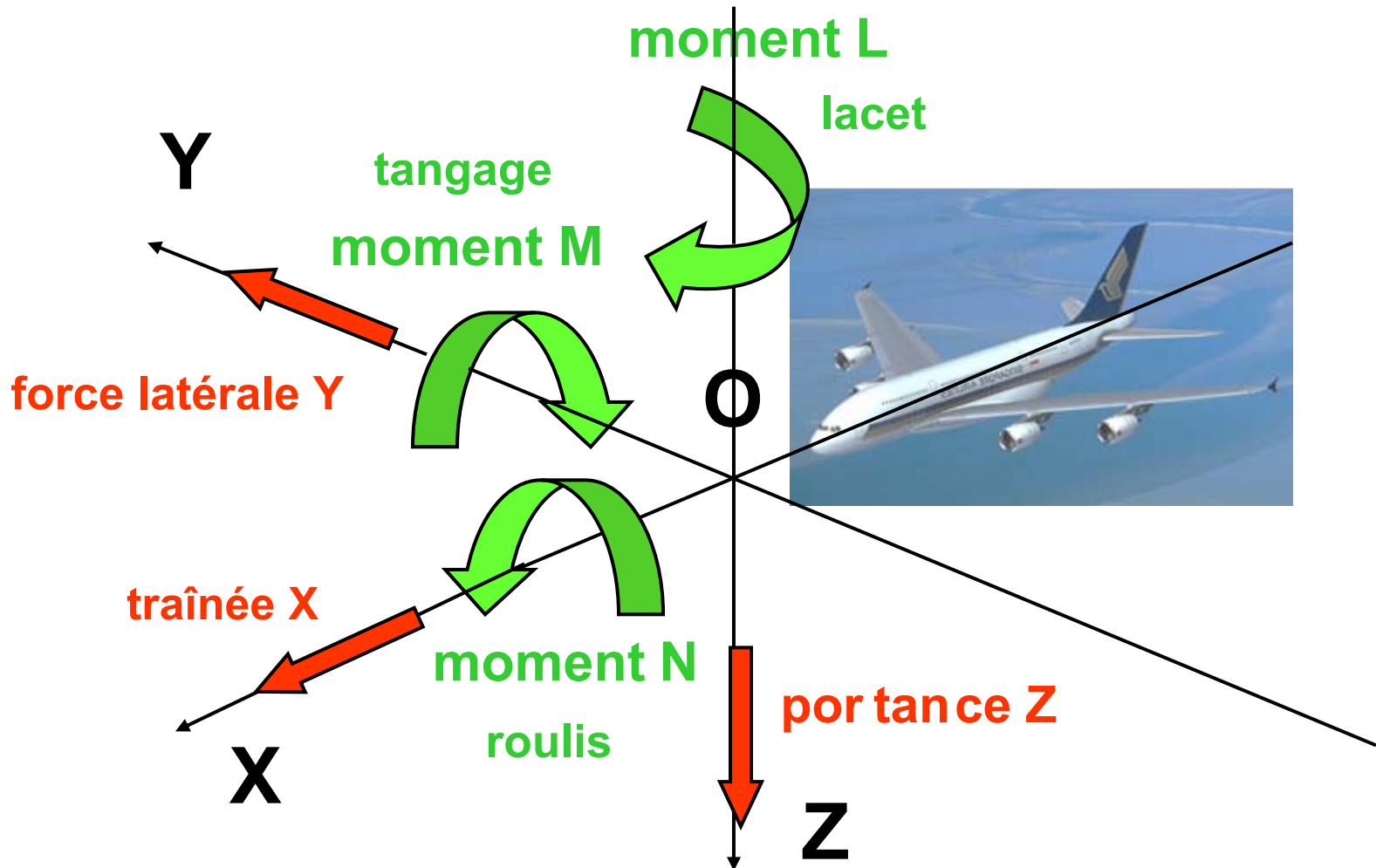
★ force \vec{F} appliquée (transportée) en G

★ moment \widehat{M} de \vec{F} par rapport à G ➔ $\widehat{M} = \overrightarrow{CG} \otimes \vec{F}$

ensemble $\left\{ \vec{F}, \widehat{M} \right\}$ ➔ torseur aérodynamique

Efforts aérodynamiques







Forces et moments du torseur aérodynamique




Efforts aérodynamiques

Décomposition des efforts aérodynamiques

composantes du moment $\hat{\mathbf{M}}$

\mathbf{M}_x		projection de $\hat{\mathbf{M}}$ selon l'axe	$\vec{\mathbf{X}}_a$		moment de roulis
\mathbf{M}_z		projection de $\hat{\mathbf{M}}$ selon l'axe	$\vec{\mathbf{Z}}_a$		moment de lacet
\mathbf{M}_y		projection de $\hat{\mathbf{M}}$ selon l'axe	$\vec{\mathbf{Y}}_a$		moment de tangage

Décomposition des efforts aérodynamiques

le trièdre avion ou maquette  *système lié à la maquette*

\vec{X}_m dans le plan de symétrie de l'avion, dirigé vers l'avant

\vec{Z}_m dans le plan de symétrie, normal à \vec{X}_m , orienté vers l'intrados

\vec{Y}_m normal au plan de symétrie, orienté vers le côté droit de l'avion

le trièdre balance  *système lié à la balance de mesure du torseur*

\vec{X}_b dans le plan de symétrie de l'avion, dirigé vers l'avant

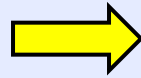
\vec{Z}_b dans le plan de symétrie, normal à \vec{X}_b , orienté vers l'intrados

\vec{Y}_b normal au plan de symétrie, orienté vers le côté droit de l'avion

l'origine du trièdre balance est un point bien défini de la balance

Décomposition des efforts aérodynamiques

R  matrice de passage d'un trièdre T1 à un autre trièdre T2



$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{T2} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{T1}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(c)\cos(b) & \sin(c)\cos(b) & -\sin b \\ -\sin(c)\cos(a) + \cos(c)\sin(b)\sin(a) & \cos(c)\cos(a) + \sin(c)\sin(b)\sin(a) & \cos(b)\sin(a) \\ \sin(c)\sin(a) + \cos(c)\sin(b)\cos(a) & -\cos(c)\sin(a) + \sin(c)\sin(b)\cos(a) & \cos(b)\cos(a) \end{bmatrix}$$

$a \rightarrow$ rotation autour de X

$b \rightarrow$ rotation autour de Y

$c \rightarrow$ rotation autour de Z

Efforts aérodynamiques

Composantes trièdre avion ou maquette

décomposition de la force

selon l'axe vertical Z



effort normal



F_N

selon l'axe longitudinal X



effort axial



F_A

selon l'axe transversal Y



effort latéral



F_Y

décomposition du moment

autour de l'axe vertical Z



moment de lacet



M_Z

autour de l'axe horizontal X



moment de roulis



M_X

autour de l'axe transversal Y



moment de tangage

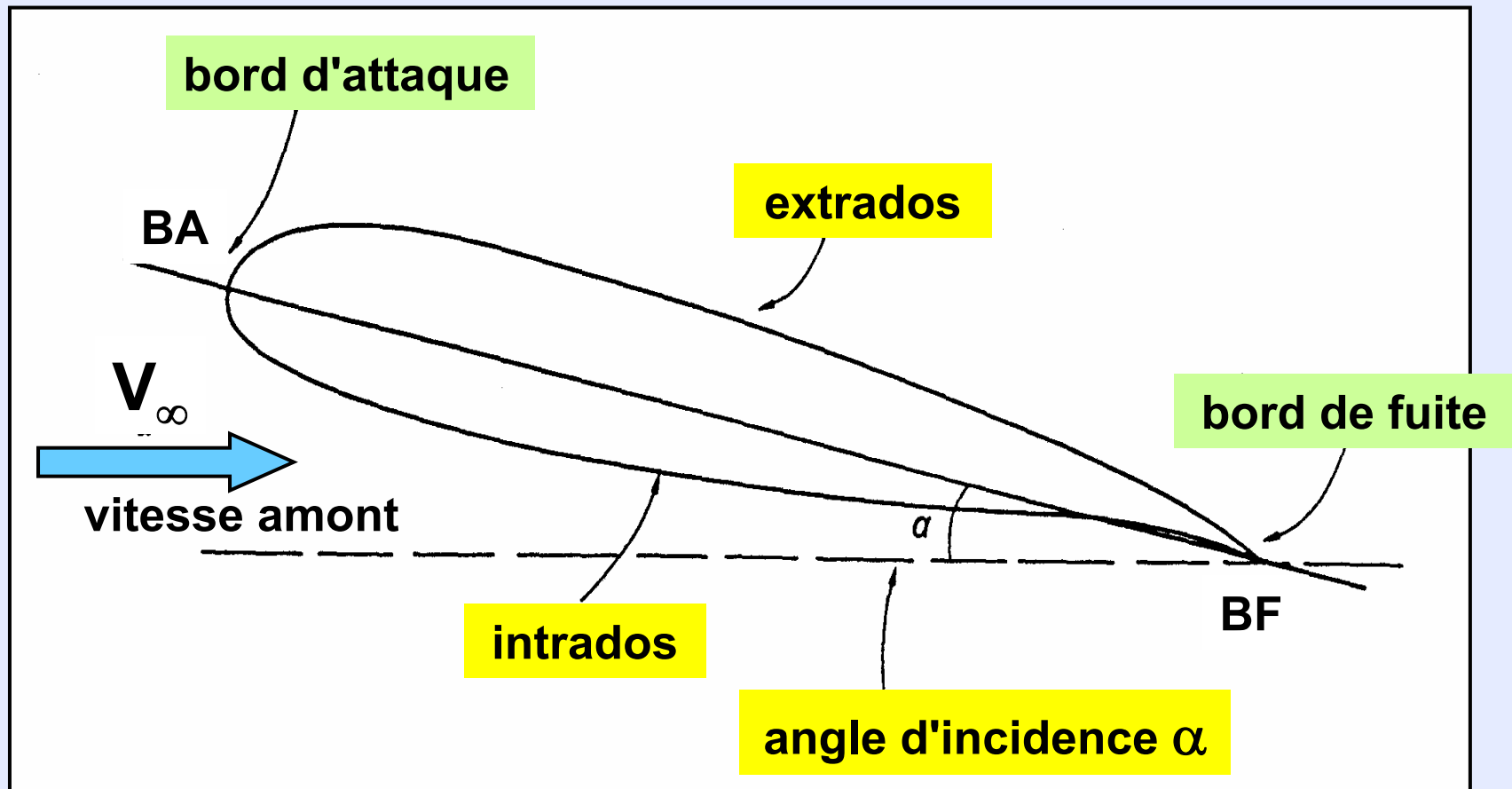


M_Y

Efforts aérodynamiques

Cas simplifié : profil bidimensionnel

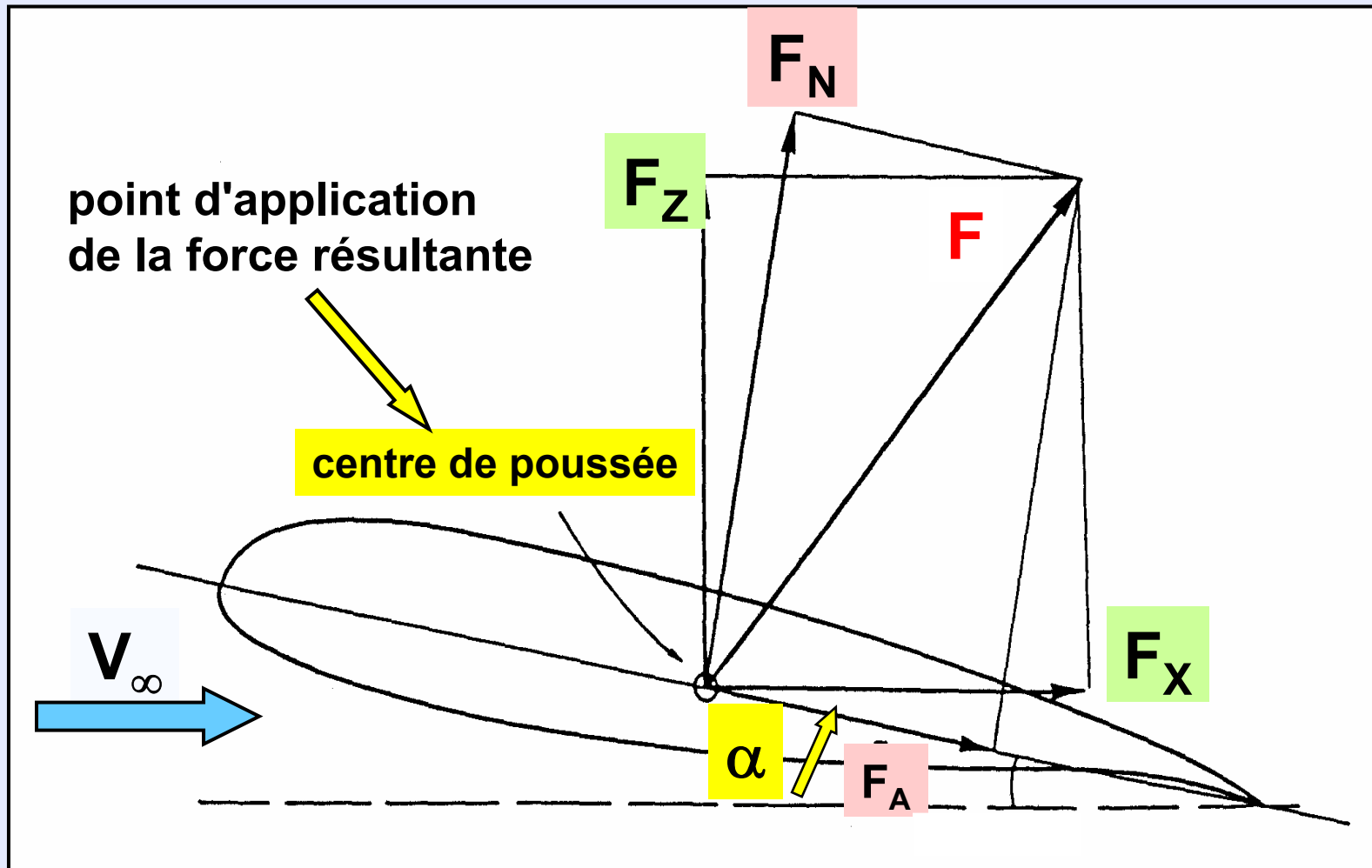
 écoulement invariant selon l'envergure supposée infinie



Efforts aérodynamiques

Profil bidimensionnel

résultante et décomposition des forces aérodynamiques



Efforts aérodynamiques

Profil bidimensionnel

résultante et décomposition des forces aérodynamiques



repère lié au profil



repère lié à la vitesse amont

F_N

force normale

F_Z

portance

F_A

force axiale

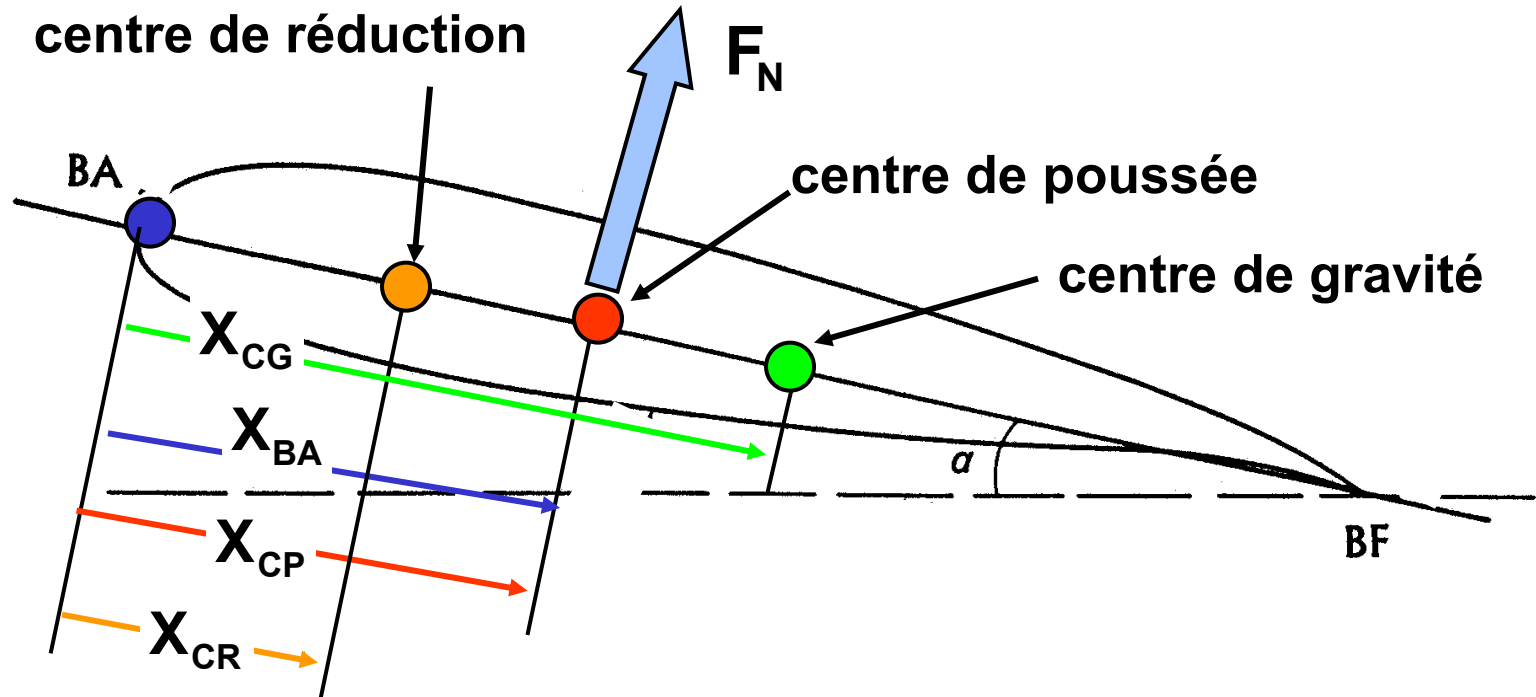
F_X

traînée

$$F_Z = F_N \cos\alpha - F_A \sin\alpha$$

$$F_X = F_N \sin\alpha + F_A \cos\alpha$$

Moment aérodynamique



moment/bord d'attaque

$$M_{BA} = X_{BA} \times F_N$$

moment/centre de gravité

$$M_{CG} = M_{BA} - X_{CG} \times F_N$$

moment/centre de poussée

$$M_{CP} = M_{BA} - X_{CP} \times F_N = 0$$

$$X_{CP} = -M_{BA} / F_N$$

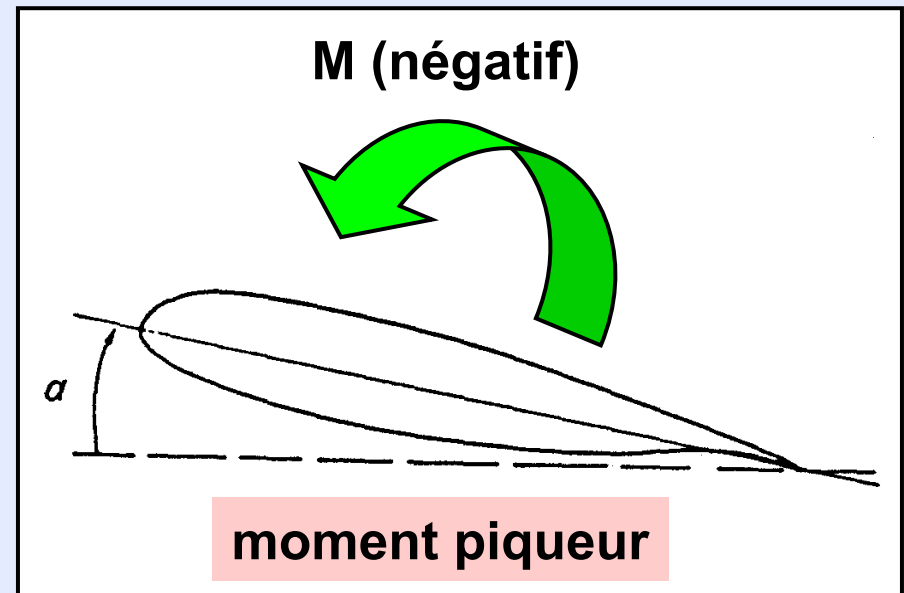
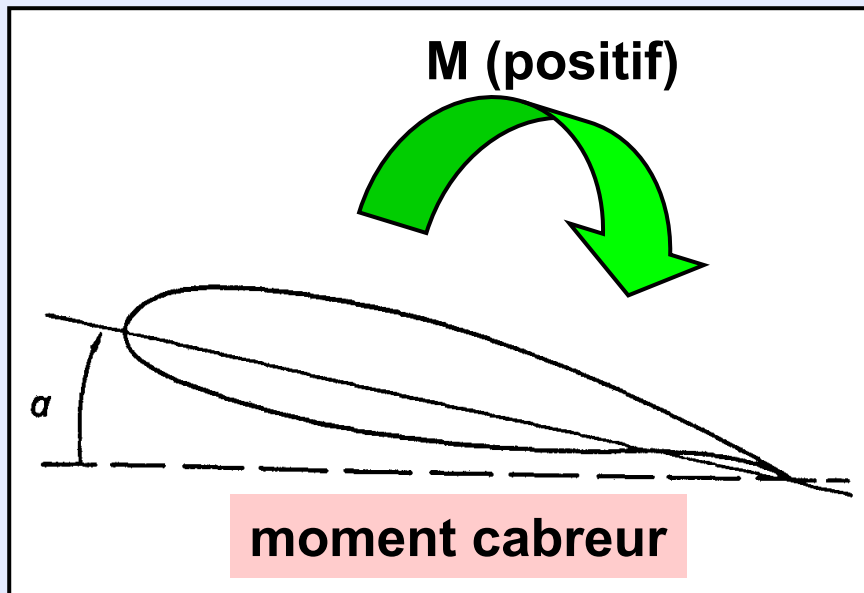
moment/centre de réduction des efforts

$$M_{CR} = M_{BA} - X_{CR} \times F_N$$

Efforts aérodynamiques

Profil bidimensionnel

moment aérodynamique



Transport du moment aérodynamique

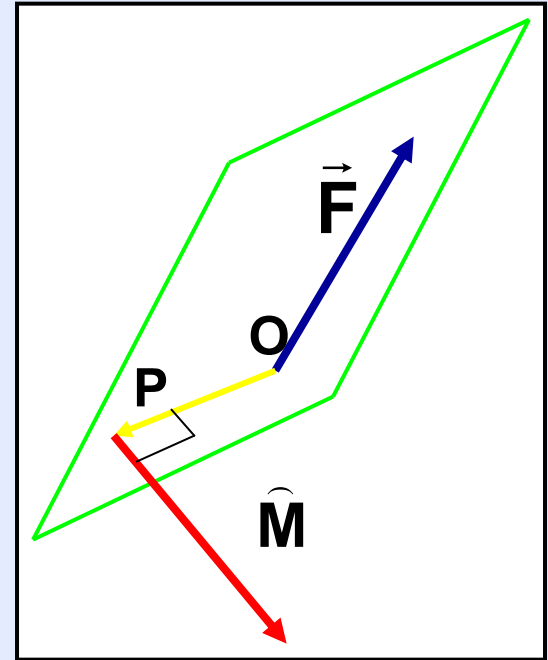
★ moment en P de la force appliquée en O

$$\widehat{\mathbf{M}}_P = \overrightarrow{OP} \otimes \vec{\mathbf{F}}$$

le moment est normal au plan défini par la force $\vec{\mathbf{F}}$ et le vecteur position \overrightarrow{OP}

★ moment transporté au point d'application G

$$\widehat{\mathbf{M}}_G = \widehat{\mathbf{M}}_P + \overrightarrow{GP} \otimes \vec{\mathbf{F}}$$



$\vec{\mathbf{F}}$ appliquée au centre de gravité \rightarrow trajectoire de l'avion

$\widehat{\mathbf{M}}$ appliqué au centre de gravité \rightarrow équilibrage de l'avion

Décomposition des efforts aérodynamiques

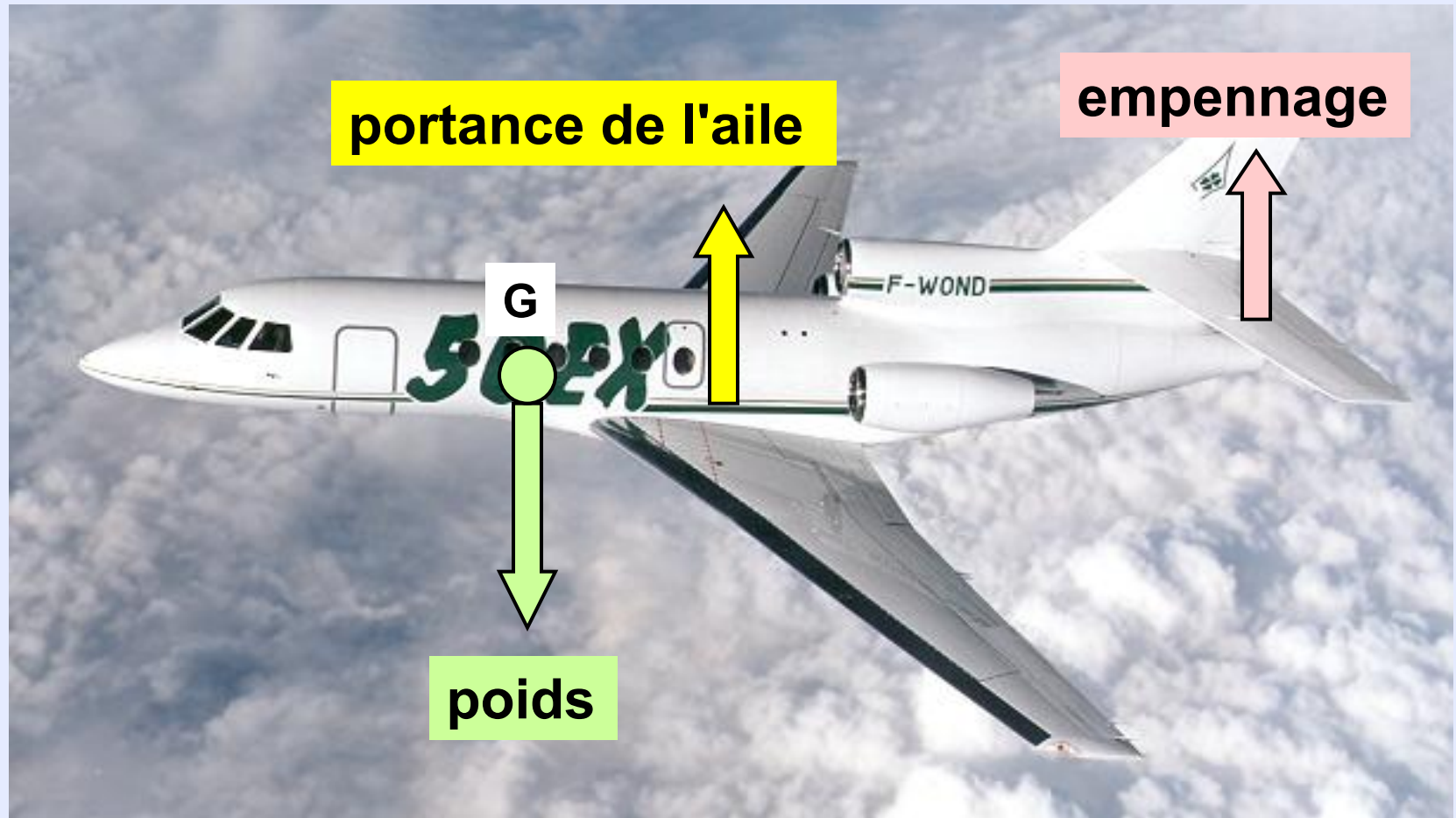
\vec{F} appliquée au centre de gravité \rightarrow trajectoire de l'avion

\hat{M} appliqué au centre de gravité \rightarrow équilibrage de l'avion



Efforts aérodynamiques

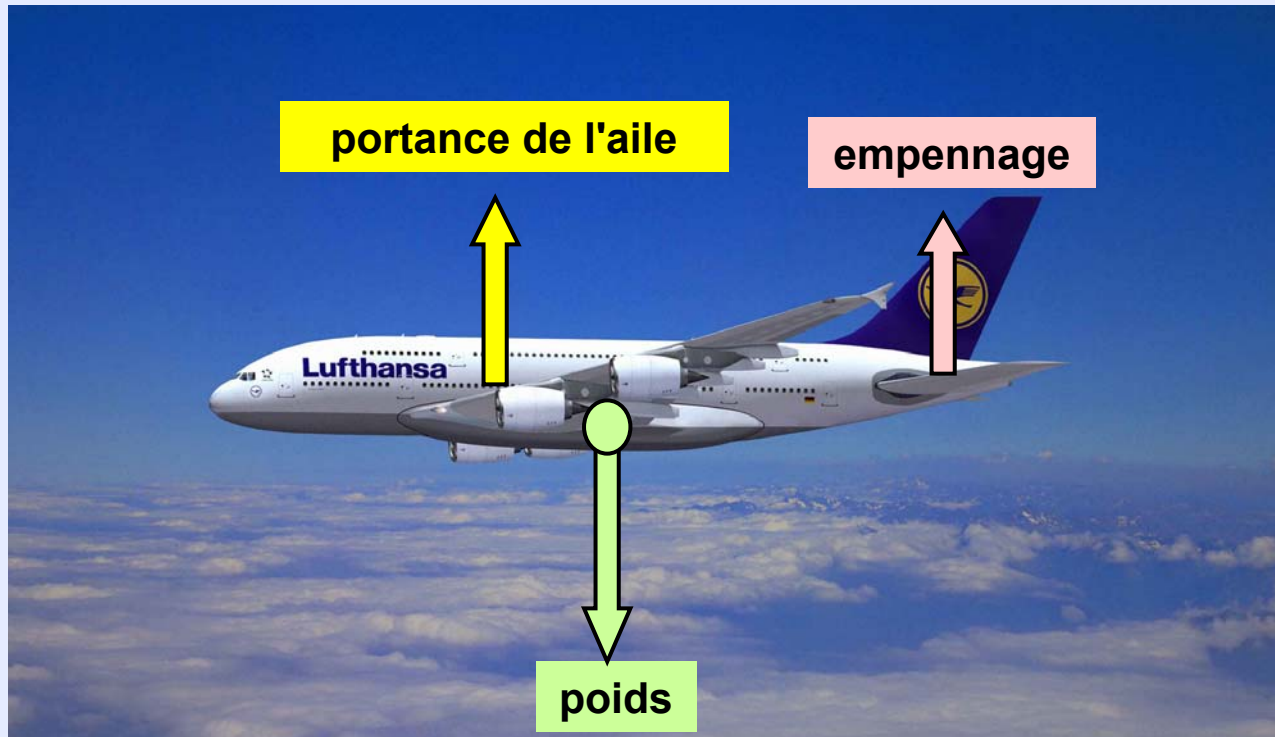
Moments aérodynamiques et équilibrage de l'avion



équilibre \Rightarrow moment [aile + empennage] / centre de gravité = 0

Efforts aérodynamiques

Équilibrage de l'avion



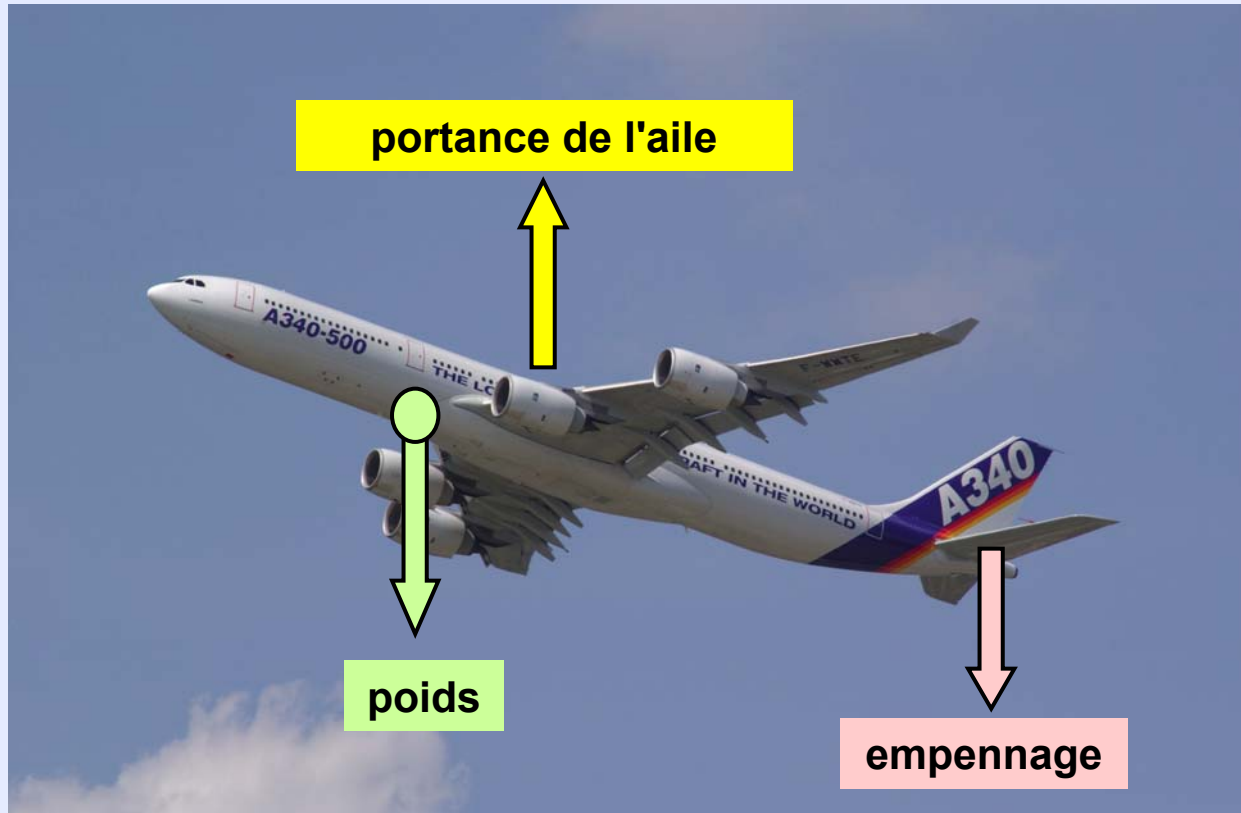
centrage arrière

centre de poussée de l'aile **en avant** du centre de gravité

l'empennage a une portance positive

Efforts aérodynamiques

Équilibrage de l'avion



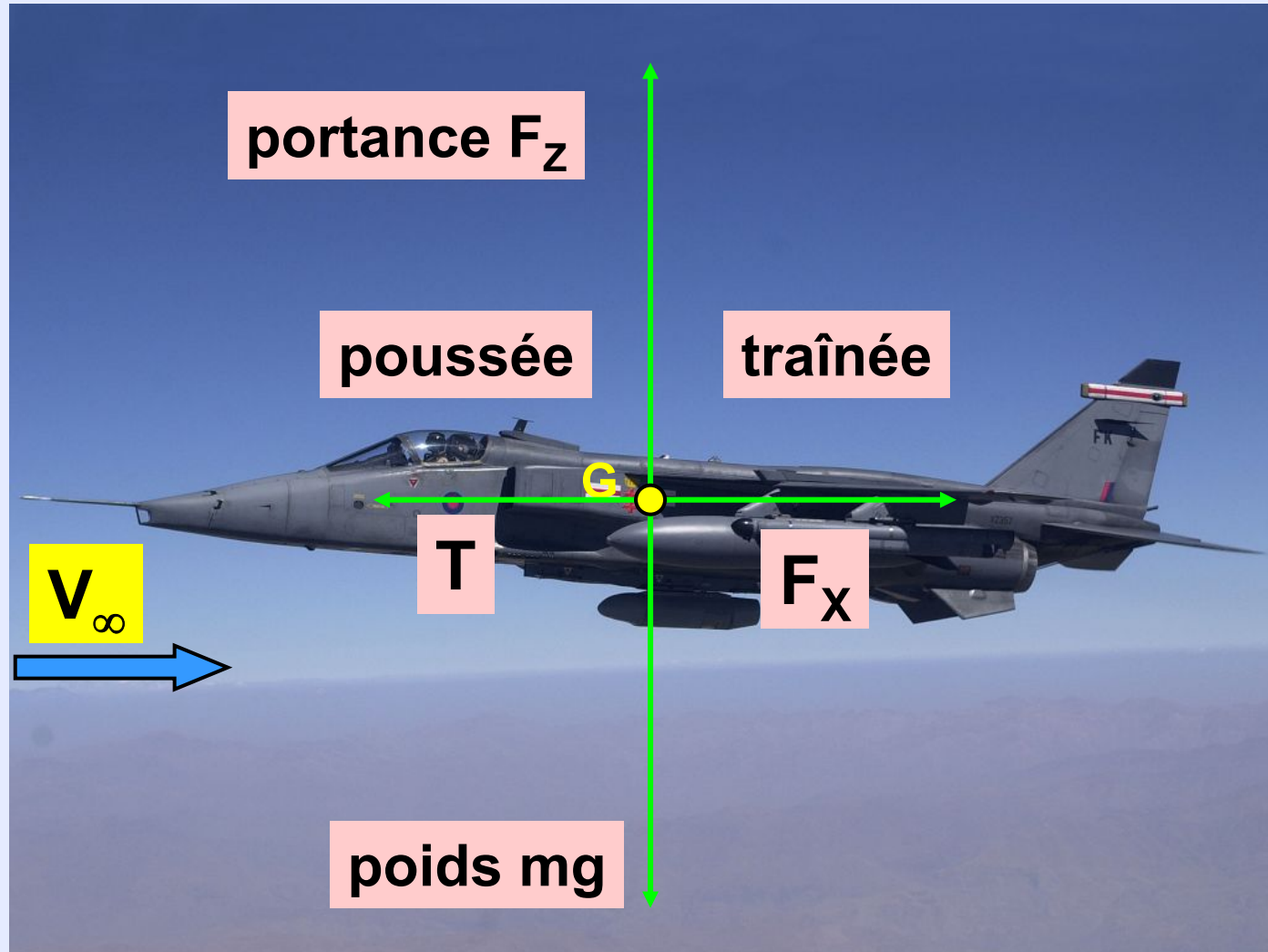
centrage avant

centre de poussée de l'aile **en arrière** du centre de gravité

l'empennage a une portance négative ou déportance

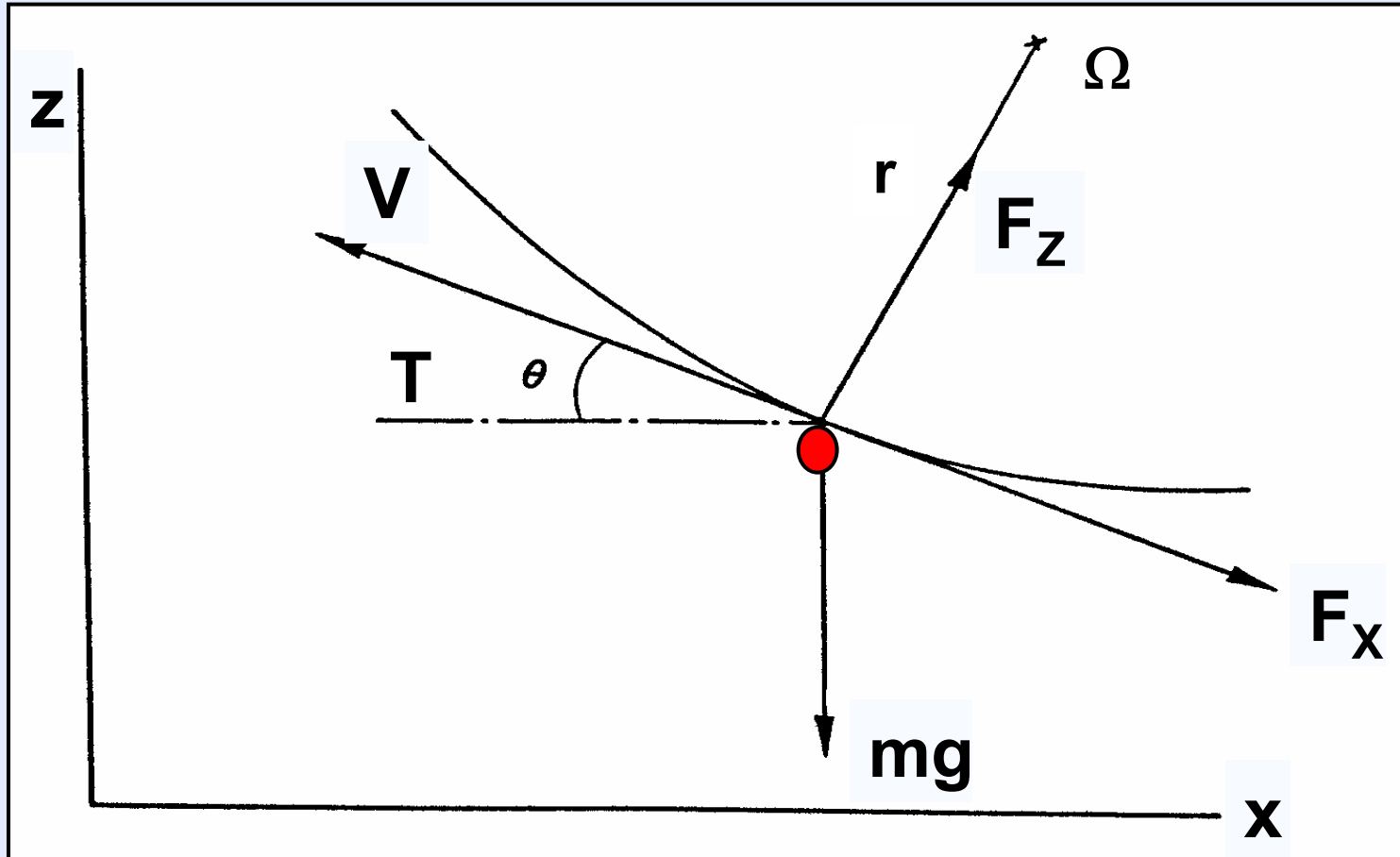
Efforts aérodynamiques

Finesse aérodynamique



forces agissant sur un avion en vol stabilisé

Finesse aérodynamique



trajectoire de l'avion dans un plan vertical

forces : poids mg , portance F_z , traînée F_x , poussée T

Efforts aérodynamiques

Finesse aérodynamique


équations du mouvement du centre de gravité

★ *selon la trajectoire*

$$m \frac{dV}{dt} = T - F_x - mg \sin \theta = T - \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S C_x - mg \sin \theta$$

★ *selon la normale*

$$m \omega^2 r = F_z - mg \cos \theta = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S C_z - mg \cos \theta$$

vitesse angulaire  $\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{V}{r}$

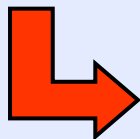
Efforts aérodynamiques

Finesse aérodynamique

vol rectiligne, à vitesse constante, sans moteur

$$0 = -F_x - mg \sin \theta = -\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S C_x - mg \sin \theta$$

$$0 = F_z - mg \cos \theta = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S C_z - mg \cos \theta$$



$$F_x = -mg \sin \theta$$

$$F_z = mg \cos \theta$$

Efforts aérodynamiques

Finesse aérodynamique

$$\cot g \theta = - \frac{F_z}{F_x} = - \frac{C_z}{C_x}$$

pente θ faible  point d'impact au sol éloigné

$$f = \frac{C_z}{C_x}$$

finesse aérodynamique

caractérise la qualité planante de l'aile ou de l'avion

planeur de vol à voile ~ 50 - Airbus ~ 20 - Concorde ~ 9
Navette Spatiale ~ 2 à 3

Efforts aérodynamiques

Finesse aérodynamique

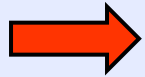
définition

$$f = \frac{F_z}{F_x} = \frac{\text{portance}}{\text{traînée}}$$

pente de la trajectoire en vol plané



$$\text{tg } \theta = \frac{1}{f}$$



qualité planante de l'avion

★ en vol à vitesse constante $F_z = m \times g$ poids de l'avion

★ traînée = effort propulsif \approx consommation en carburant

finesse \rightarrow $\frac{\text{poids de l'avion}}{\text{consommation}} \approx \frac{\text{charge utile}}{\text{coût d'exploitation}}$

finesse \rightarrow efficacité aérodynamique

Efforts aérodynamiques

Formule de Bréguet

consommation en carburant \rightarrow diminution de masse

C_s \rightarrow consommation spécifique \searrow

$$dm = -C_s T dt$$

*masse de kérosène/newton de
poussée/seconde*

vol à vitesse constante \rightarrow $T = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x$ $mg = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z$

$$\frac{dm}{m} = -\frac{g}{\frac{1}{2} \rho V^2 S C_z} C_s \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x \frac{dx}{V} \rightarrow \boxed{\frac{dm}{m} = -g \frac{C_s}{f V} dx}$$

Efforts aérodynamiques

Formule de Bréguet

distance franchissable $L = x_2 - x_1 = \frac{aM}{g} \frac{f}{C_s} \text{Log} \left(\frac{m_1}{m_2} \right)$

importance du groupement

$$\frac{fM}{C_s}$$

finesse
nombre de Mach
consommation spécifique

	Boeing 707	Airbus A340	Concorde	Avion de combat
C_s	0,95	0,65	1,21	2,5
f	16	19	7,3	3,5
M	0,75	0,83	2	2
fM/C_s	12,6	24,3	12	2,8

Méthodes de mesure en aérodynamique



Mesure des efforts et moments

Vickers Supermarine Spitfire

Méthodes de mesure en aérodynamique

Mesure des efforts et moments

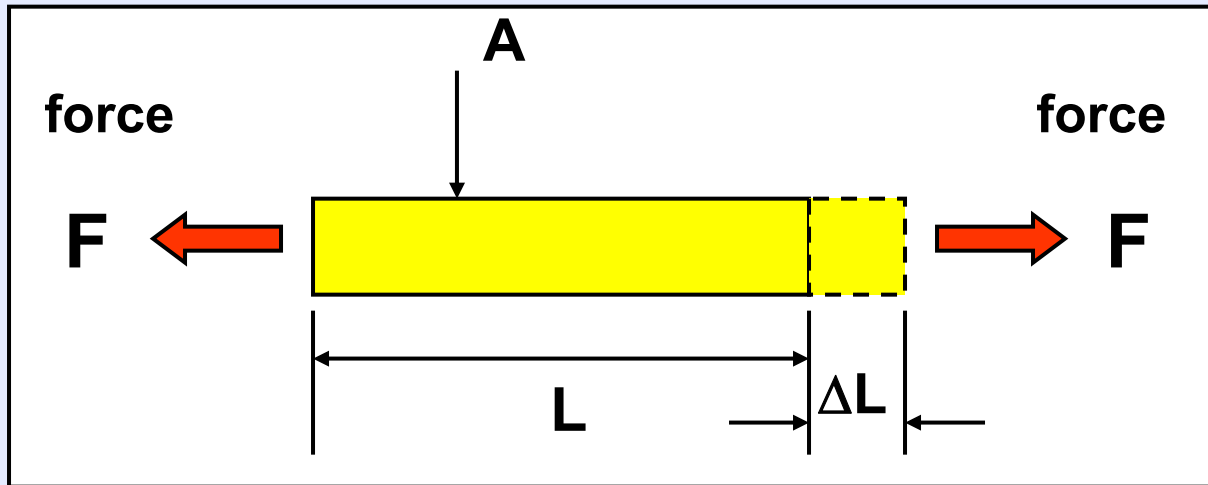
Utilisation d'une balance d'efforts ou balance aérodynamique

- ★ la balance est soumise à la force et au moment à mesurer
- ★ elle réalise **la décomposition du torseur en ses 6 composantes**
- ★ problème du découplage → chaque composante doit être mesurée séparément **sans influence des autres composantes**

Principe général

- ★ mesure **de la déformation d'une lame ou poutre** sous l'effet de la composante considérée
- ★ chaque composante est mesurée par un **dynamomètre à jauges de contrainte**

Déformation et contrainte



taux de déformation \longrightarrow

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

contrainte \longrightarrow

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

\longrightarrow exprimée en *pascals*

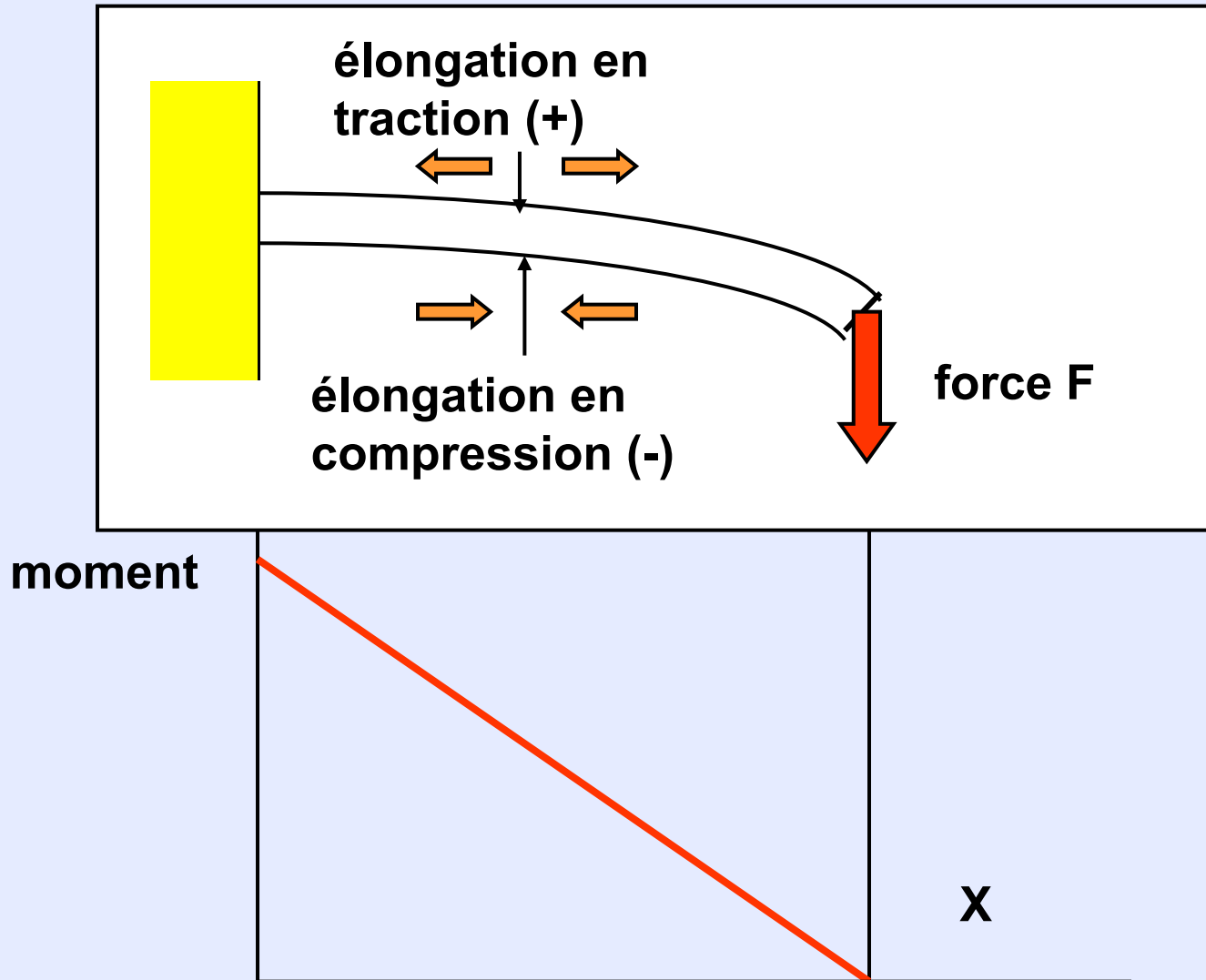
relation contrainte - déformation

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

E \longrightarrow **module de Young**

mesure de ε \longrightarrow σ

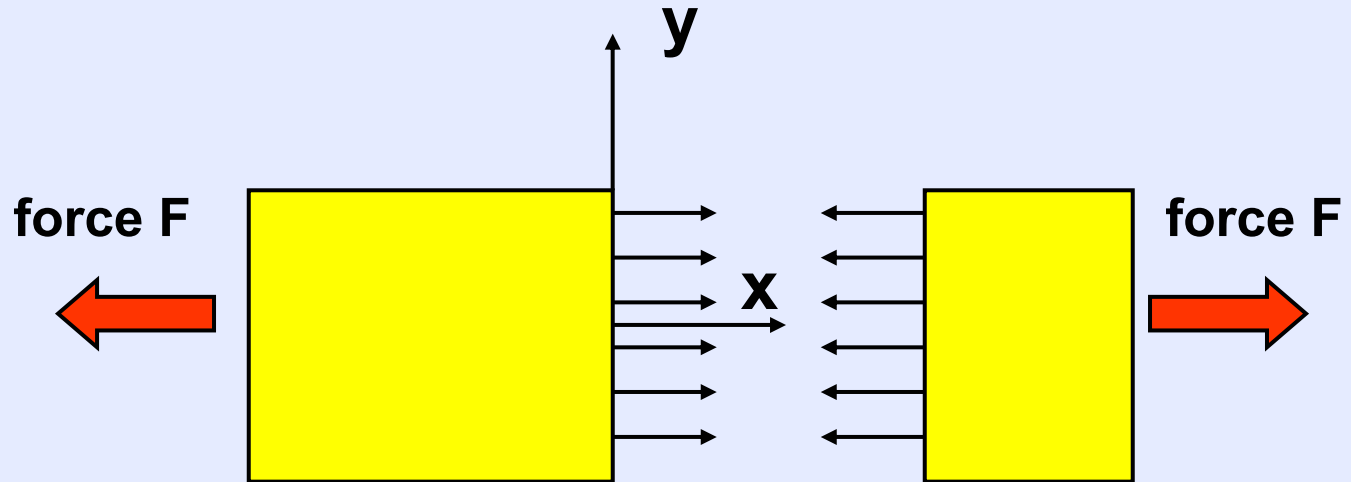
Poutre encastrée



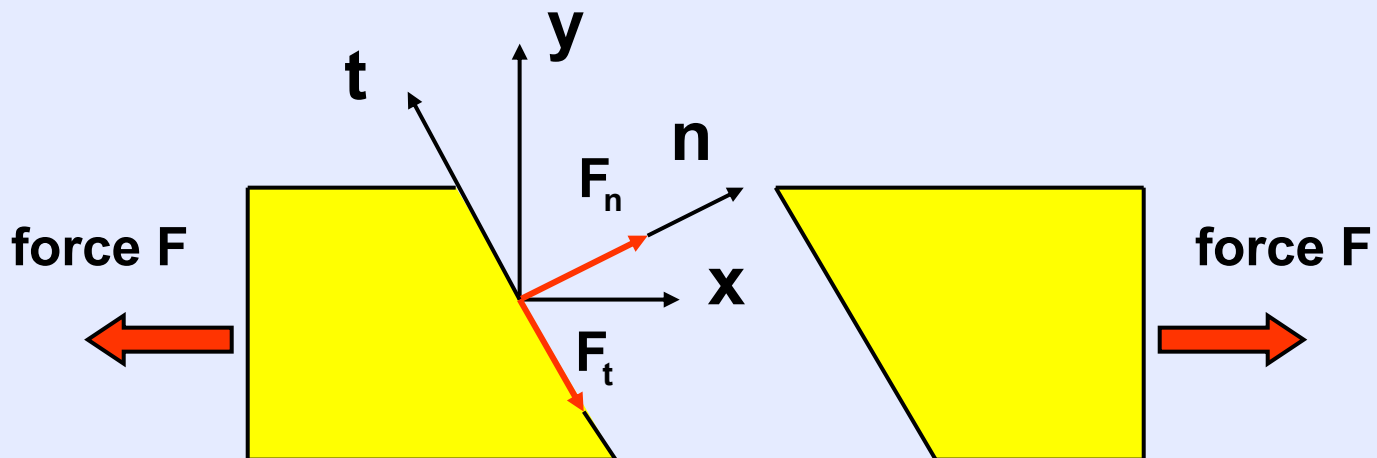
répartition du moment le long de la poutre

Composantes de la contrainte

contrainte normale



contrainte de cisaillement

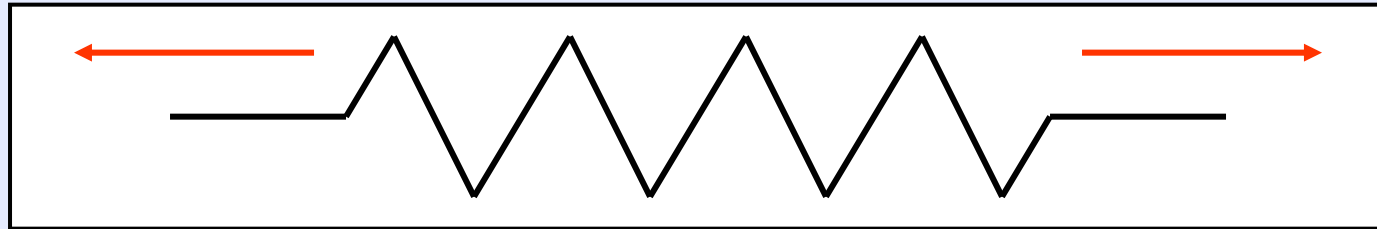


Mesure des contraintes

Jauge de déformation (ou de contrainte)

allongement ΔL  variation de résistance ΔR

élément résistant  fil ou semi-conducteur



variation de résistance

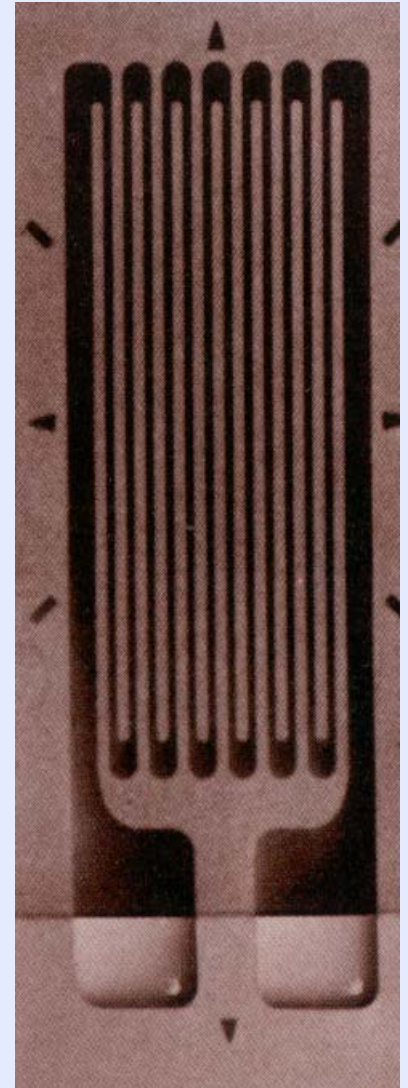
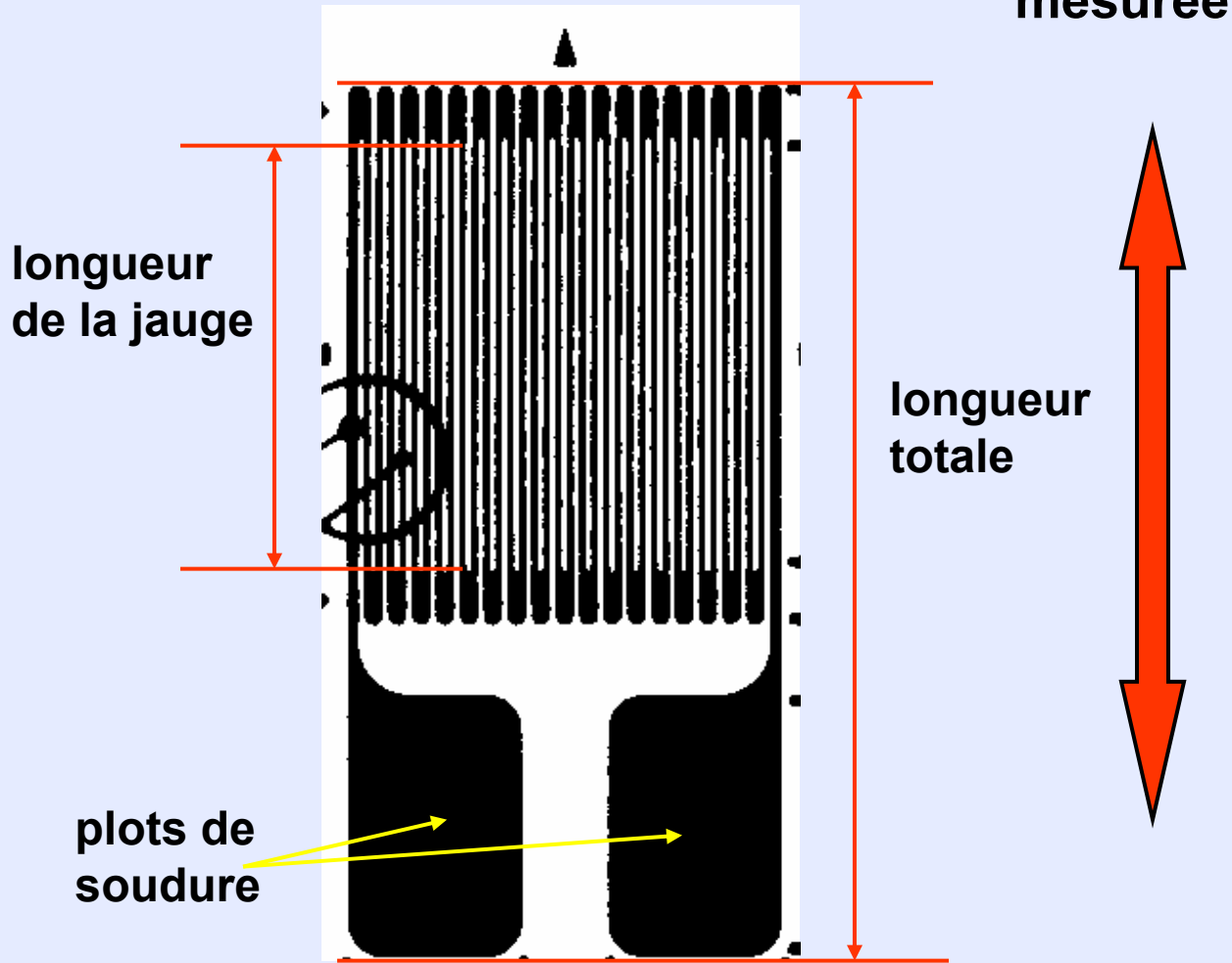
$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L}$$

facteur de jauge 

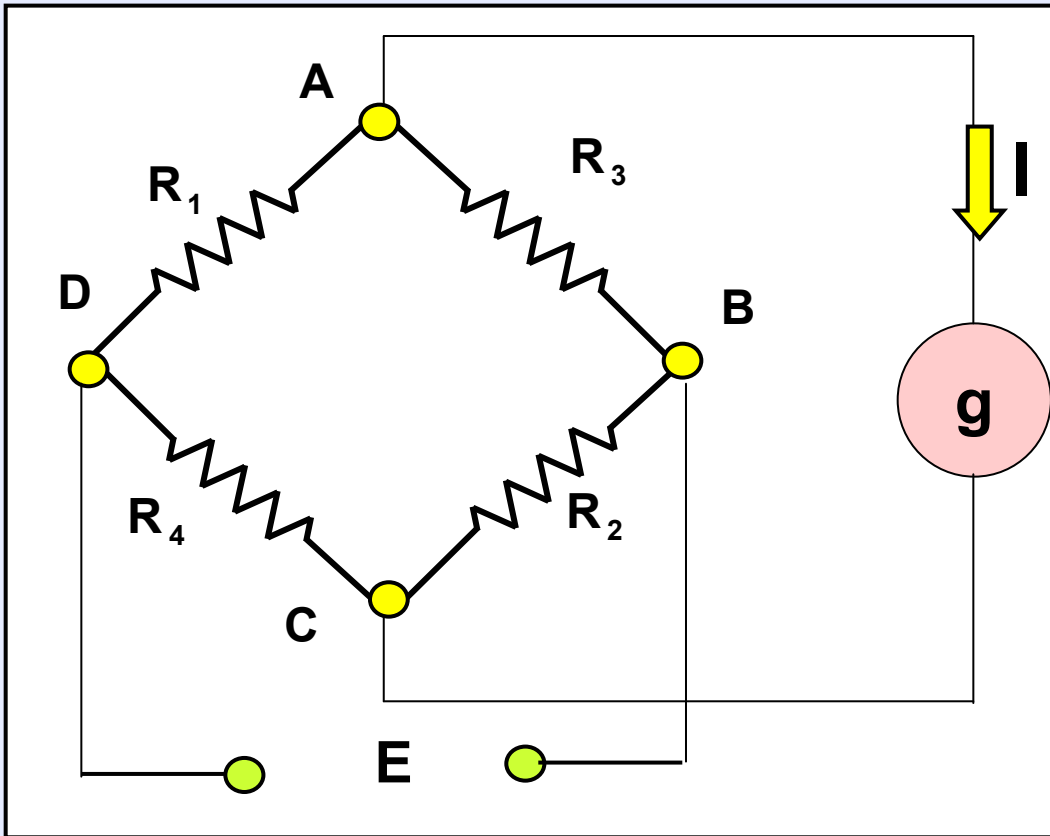
$$k = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}$$

Mesure des contraintes

Jauge de contrainte



Théorie du pont de Wheatstone



AC : diagonale de mesure

BD : diagonale d'alimentation

$I \equiv$ intensité mesurée

$g \equiv$ résistance interne de l'appareil

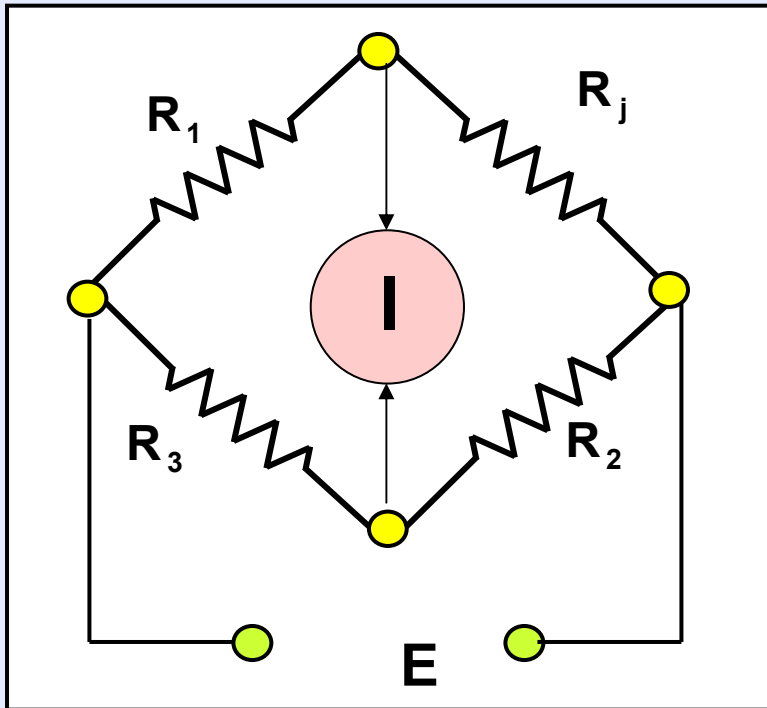
$E \equiv$ tension d'alimentation

relation fondamentale



$$I = E \frac{R_3 R_4 - R_1 R_2}{g(R_1 + R_3)(R_2 + R_4) + R_1 R_3 (R_2 + R_4) + R_2 R_4 (R_1 + R_3)}$$

Théorie du pont de Wheatstone



$I \equiv$ intensité mesurée

$g \equiv$ résistance interne

$E \equiv$ tension d'alimentation

pont équilibré $\rightarrow I = 0$

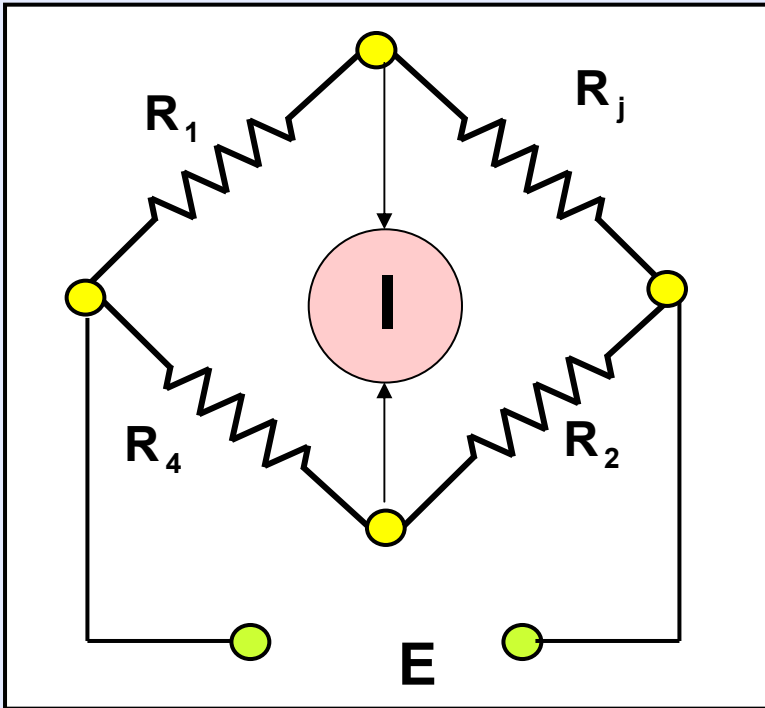
$R_j \equiv R_2$ résistance à mesurer

$$R_j R_3 - R_1 R_4 = 0 \rightarrow R_j R_3 = R_1 R_4$$

$$R_j = \frac{R_1 R_4}{R_3} \rightarrow R_j \text{ si } R_1, R_3, R_4 \text{ connues}$$

méthode de zéro \rightarrow rarement utilisée

Théorie du pont de Wheatstone



$I \equiv$ intensité mesurée

$g \equiv$ résistance interne

$E \equiv$ tension d'alimentation

fonctionnement en
pont non équilibré

R_1, R_2, R_4 connues

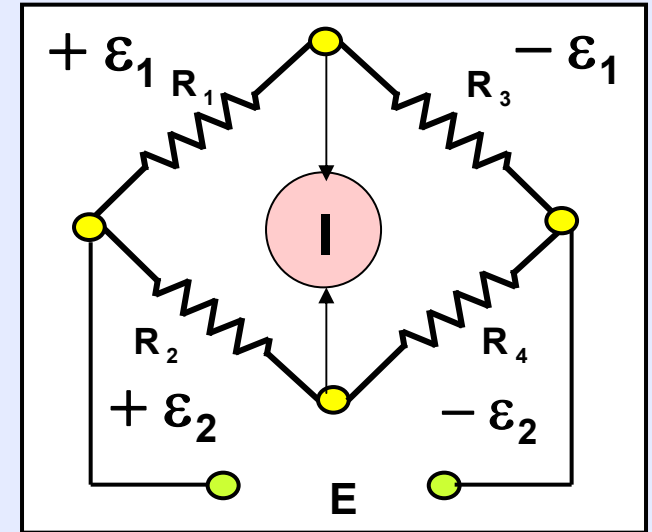
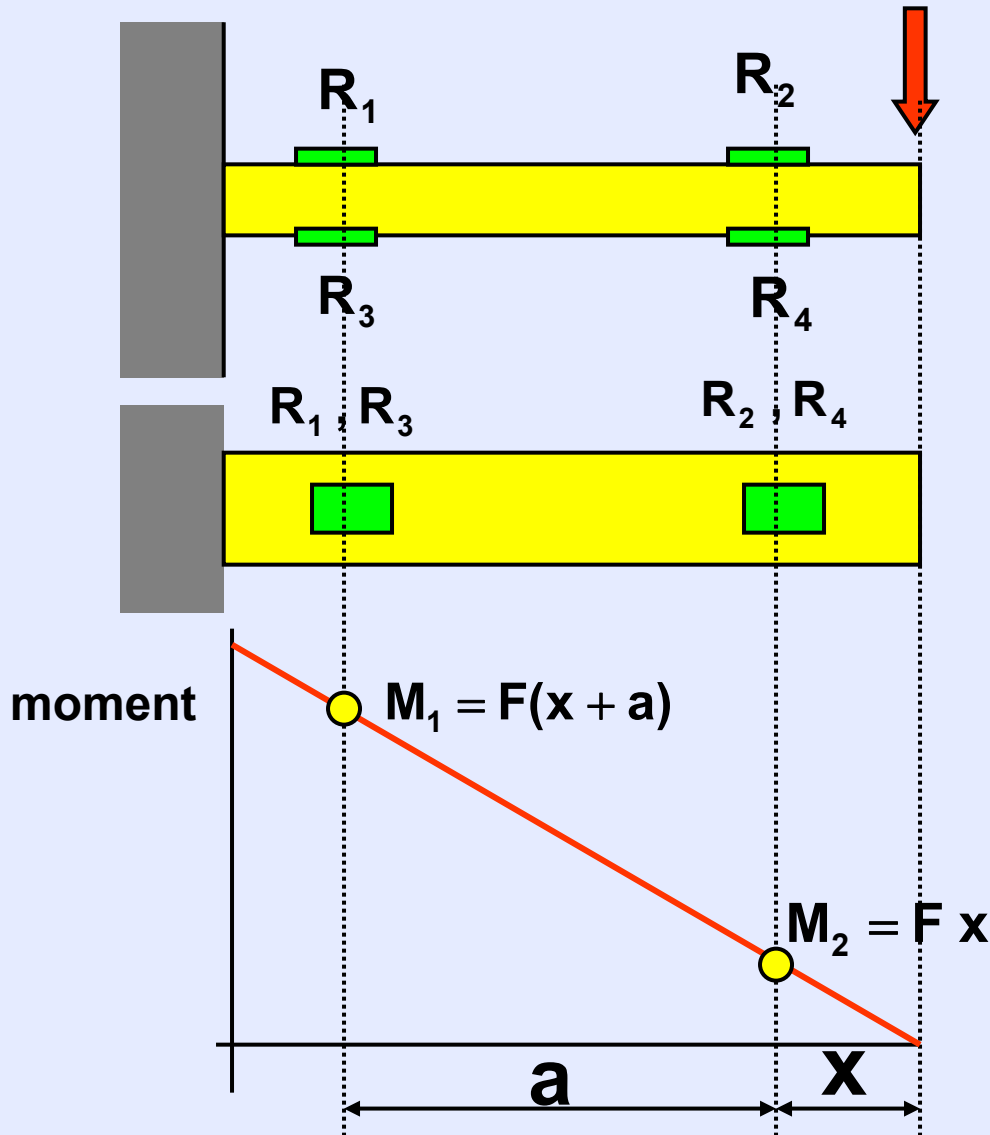
mesure du courant de déséquilibre $I \rightarrow R_j$

étalonnage avec des résistance R_3 connues

\rightarrow relation $I = f(R_3) \rightarrow R_j$

Mesure des efforts

Mesure d'un effort dont on ne connaît pas le point d'application



réponse des jauges

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \epsilon_1 = KF(x + a)$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \epsilon_2 = KFx$$

Mesure des efforts

Mesure d'un effort dont on ne connaît pas le point d'application

en l'absence d'effort

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$R_1 = R(1 + \varepsilon_1) \quad R_3 = R(1 - \varepsilon_1)$$

$$R_2 = R(1 + \varepsilon_2) \quad R_4 = R(1 - \varepsilon_2)$$

avec $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \ll 1$

numérateur de l'expression générale

$$\rightarrow R^2[(1 + \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_1) - (1 + \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)] = 2R^2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$$

dénominateur



$$4R^2(g + R)$$

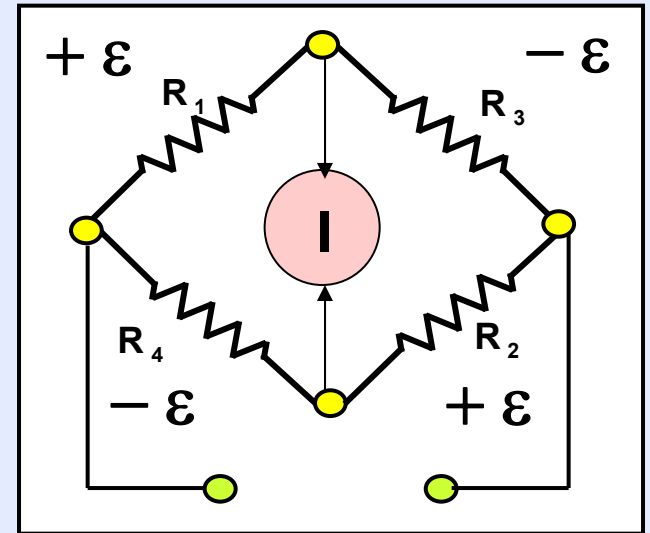
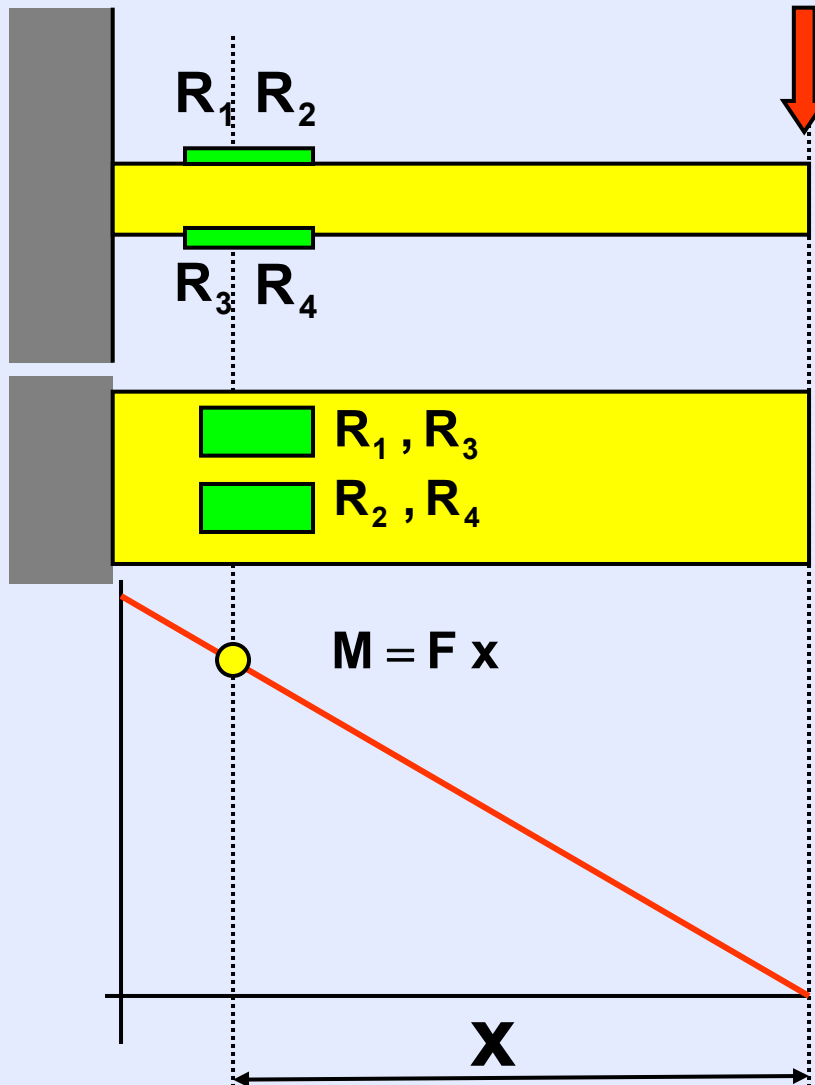
$$\rightarrow I \approx E \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2(g + R)} \quad I \approx -\frac{E}{2(g + R)} KFa = k F$$

$$I = k F$$

mesure de la force F

Mesure des efforts

Mesure du moment de flexion dans une section



$$R_1 = R_2 = R (1 + \epsilon)$$

$$R_3 = R_4 = R (1 - \epsilon)$$

$$\epsilon = KM$$

Mesure des efforts

Mesure du moment de flexion dans une section

numérateur de l'expression générale

$$\rightarrow R^2 \left[(1+\varepsilon)^2 - (1-\varepsilon)^2 \right] = 4 R^2 \varepsilon$$

dénominateur $\rightarrow 4R^2(g+R)$

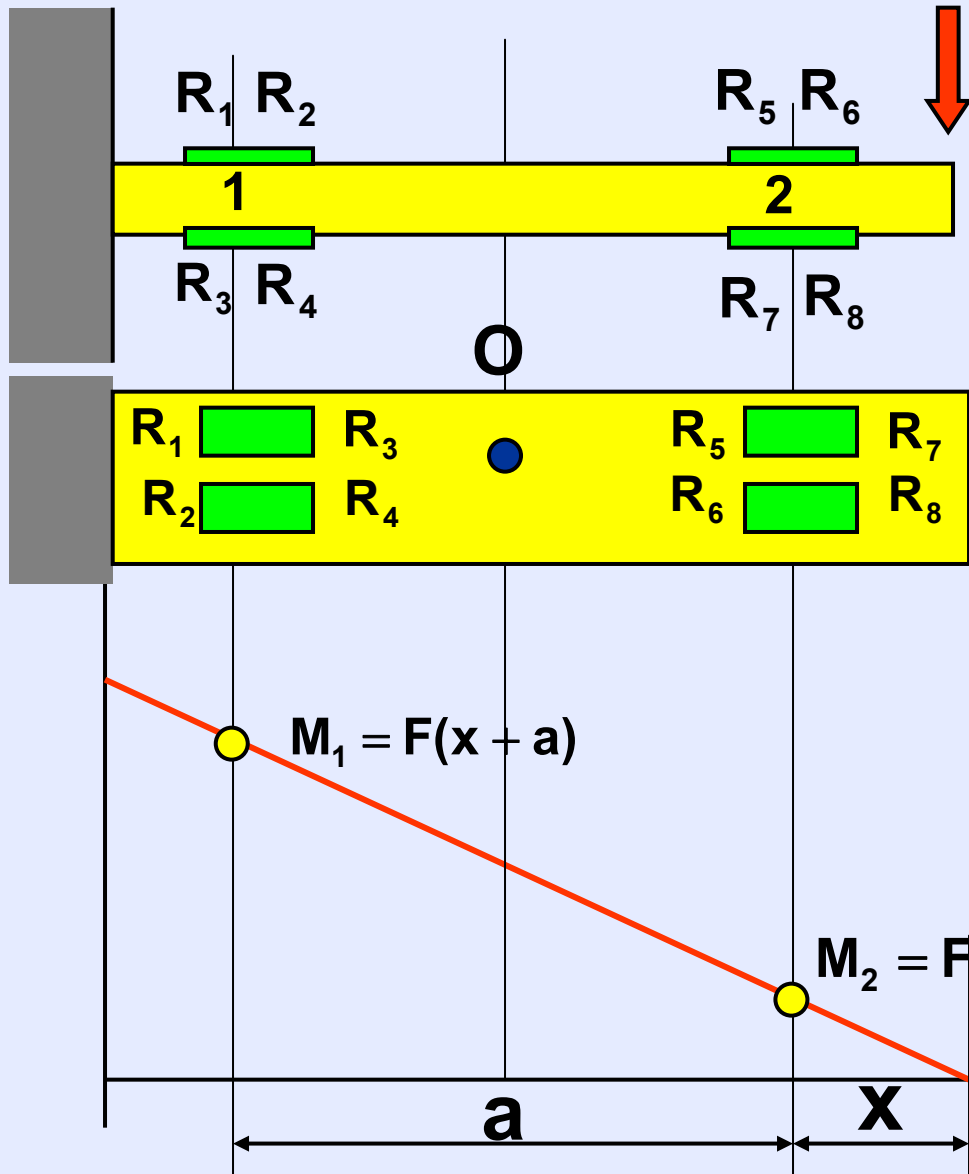
$$\rightarrow I \approx -E \frac{4\varepsilon}{4(g+R)} = -\frac{E}{(g+R)} \text{KM}$$



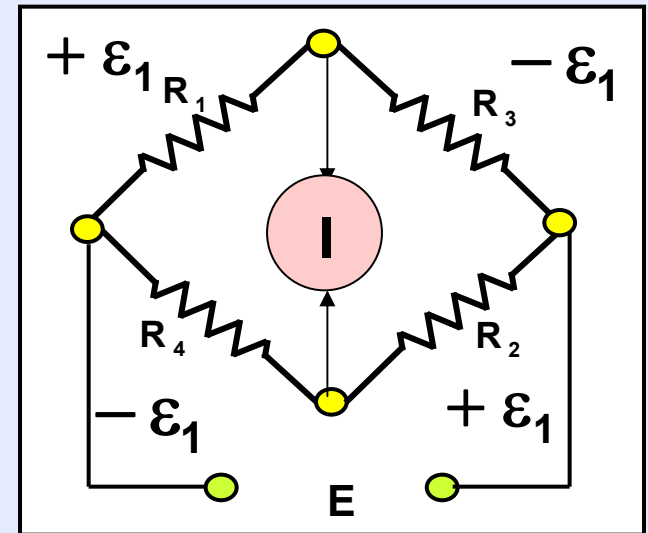
$$I = k M$$

Mesure des efforts

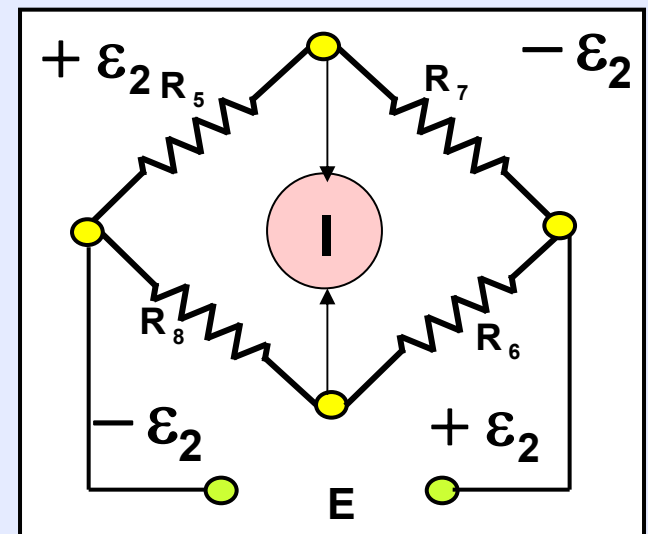
Mesure de l'effort et du moment avec deux ponts



pont 1



pont 2



Mesure des efforts

Mesure de l'effort et du moment avec deux ponts

$$I_1 \approx -E \frac{\varepsilon_1}{(g+R)} = -\frac{E}{(g+R)} K M_1$$

↳ $I_1 = k M_1 = k F (x + a)$

$$I_2 \approx -E \frac{\varepsilon_2}{(g+R)} = -\frac{E}{(g+R)} K M_2$$

↳ $I_2 = k M_2 = k F x$

soustraction des signaux

→ $I_2 - I_1 = k F x - k (F + a) = -k a F$

↳ $\text{force } F$

Mesure des efforts

Mesure de l'effort et du moment avec deux ponts

$$I_1 = k M_1 = k F (x + a)$$

$$I_2 = k M_2 = k F x$$

addition des signaux

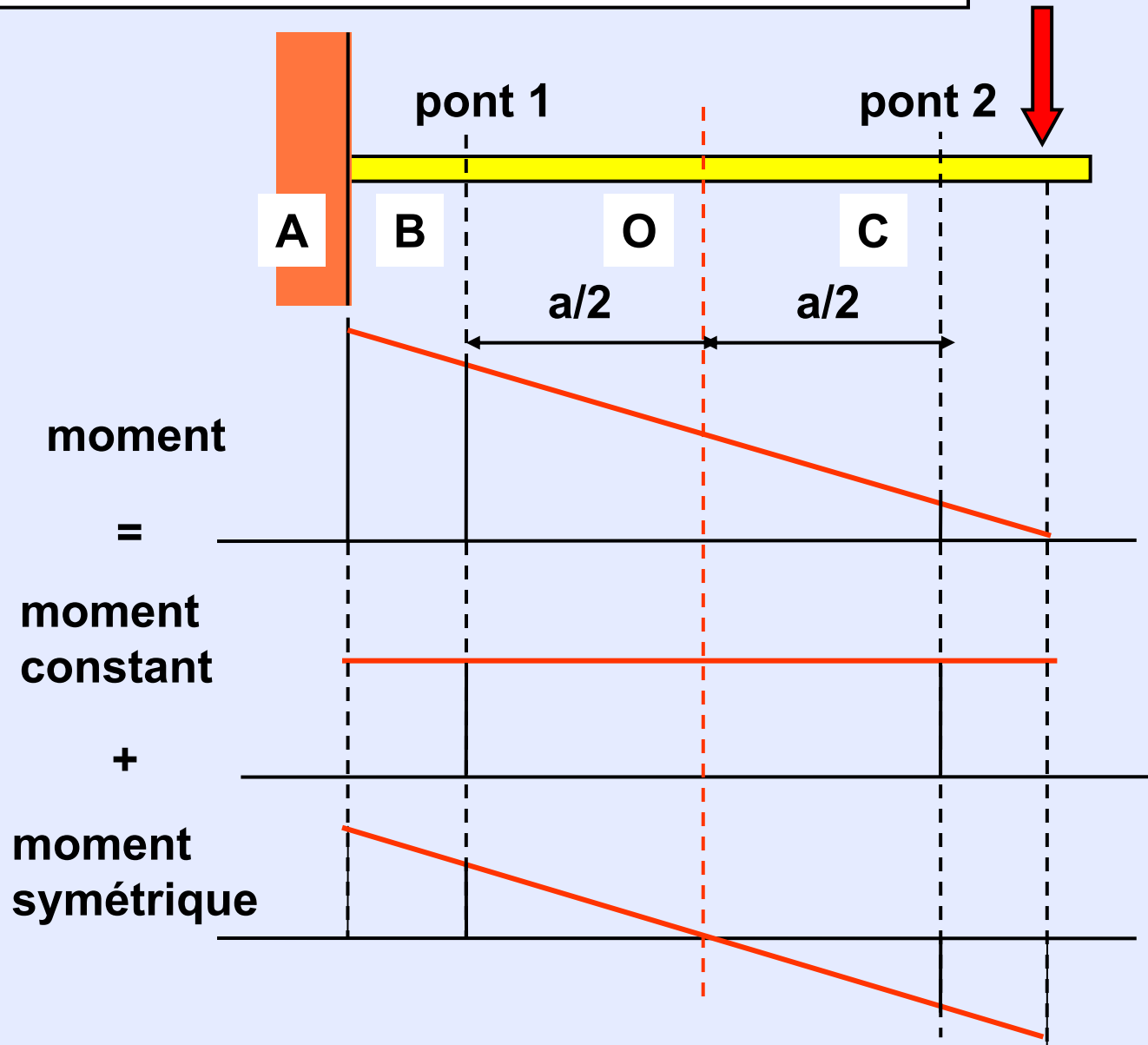
$$\longrightarrow I_2 + I_1 = k F x + k (F + a) = -2k F \left(x + \frac{a}{2} \right)$$



moment de la force F par rapport au point milieu O

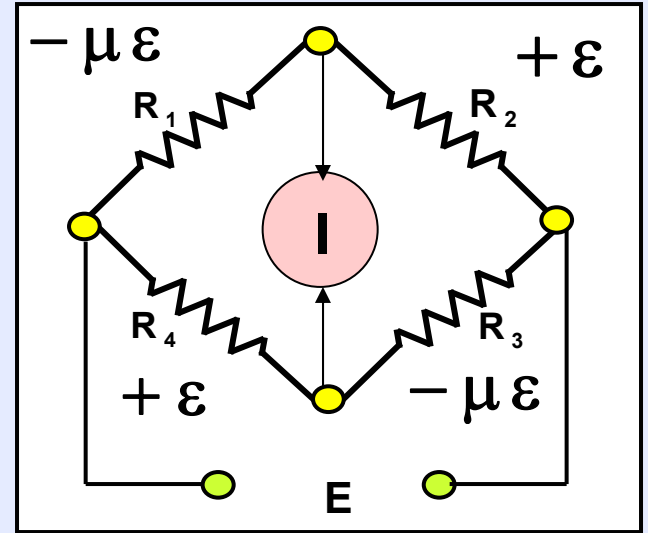
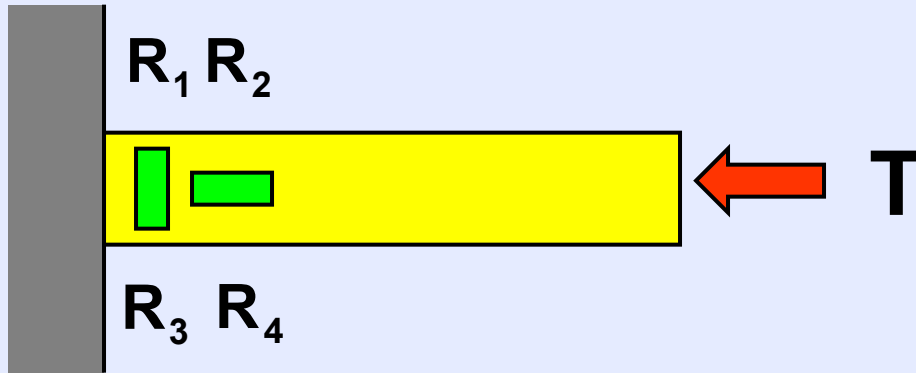
Mesure des efforts

Mesure de l'effort et du moment avec deux ponts



Mesure des efforts

Mesure directe de la traînée



$$R_1 = R(1 - \epsilon\mu)$$

$$R_2 = R(1 + \epsilon)$$

$$R_3 = R(1 - \epsilon\mu)$$

$$R_4 = R(1 + \epsilon)$$

μ coefficient de Poisson

formule générale

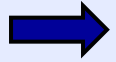
$$I = E \frac{R^2 [2\epsilon(1 + \mu) + \epsilon^2(1 - \mu^2)]}{4R^2(g + R)} \approx E \frac{\epsilon(1 + \mu)}{2(g + R)}$$

$$I = kX \rightarrow$$

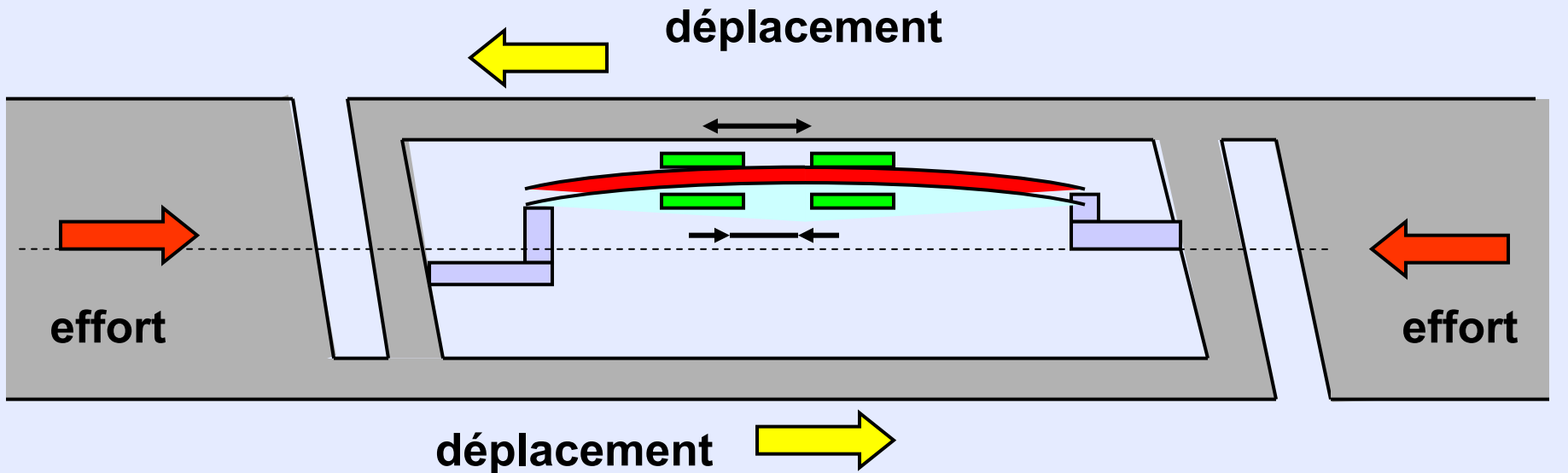
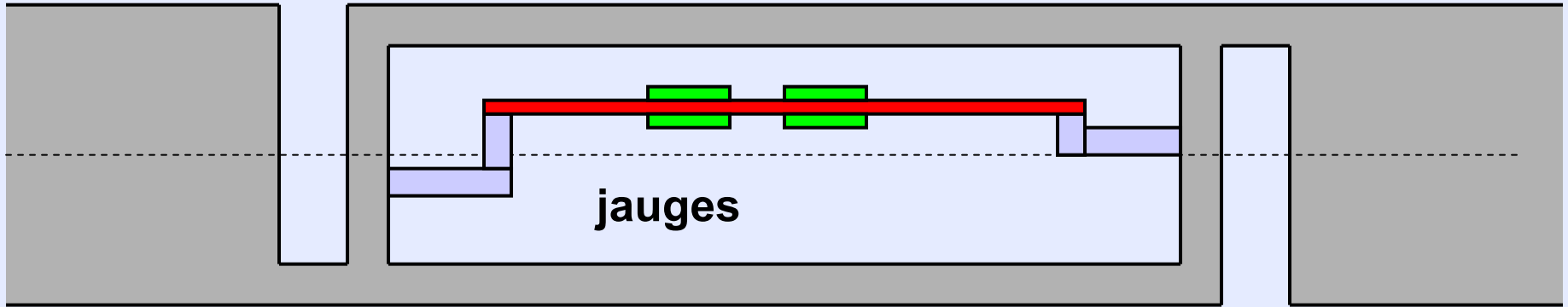
effort de traînée faible \rightarrow *sensibilité insuffisante*

Mesure des efforts

Mesure de la force de traînée par parallélogramme déformant

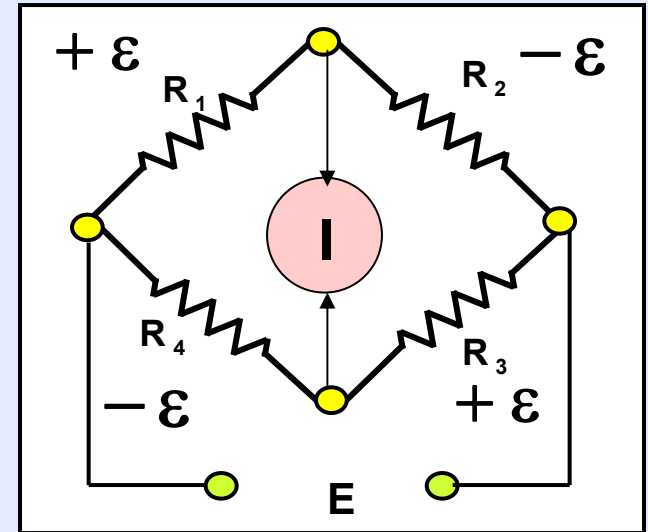
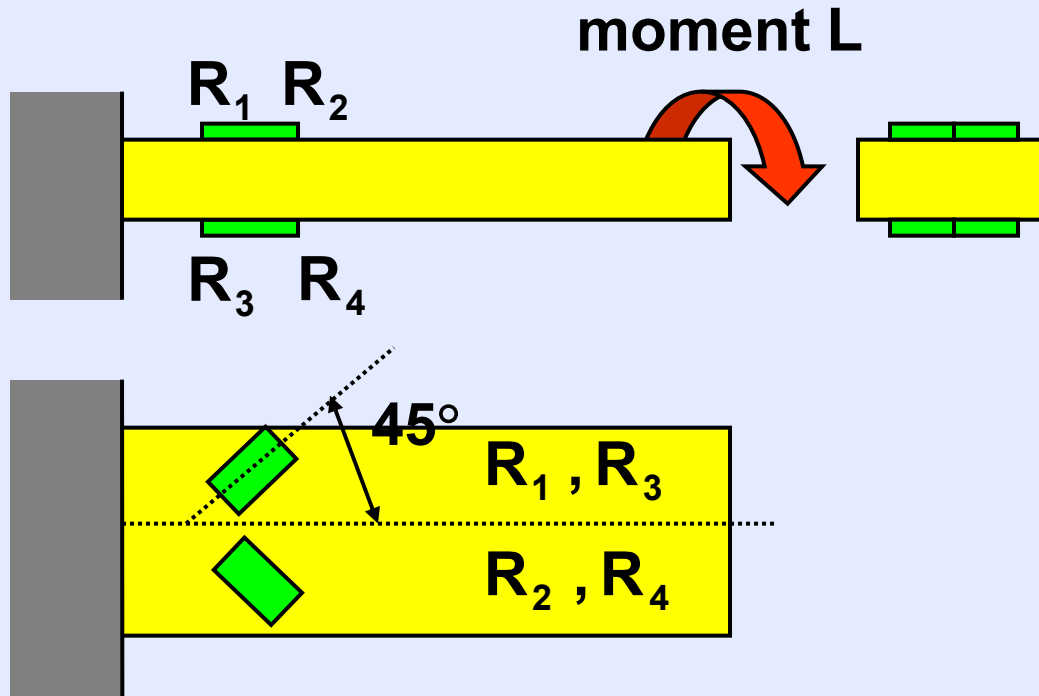


amplification des efforts à mesurer par les jauges



Mesure des efforts

Mesure du moment de roulis



jauges collées à 45° dans la direction des contraintes principales d'extension



$$I = kL$$

Méthodes de mesure en aérodynamique

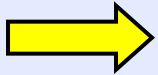


Mesure des efforts aérodynamiques

maquette de *Rafale* montée sur dard anémométrique dans la soufflerie transsonique S1MA de l'Onera

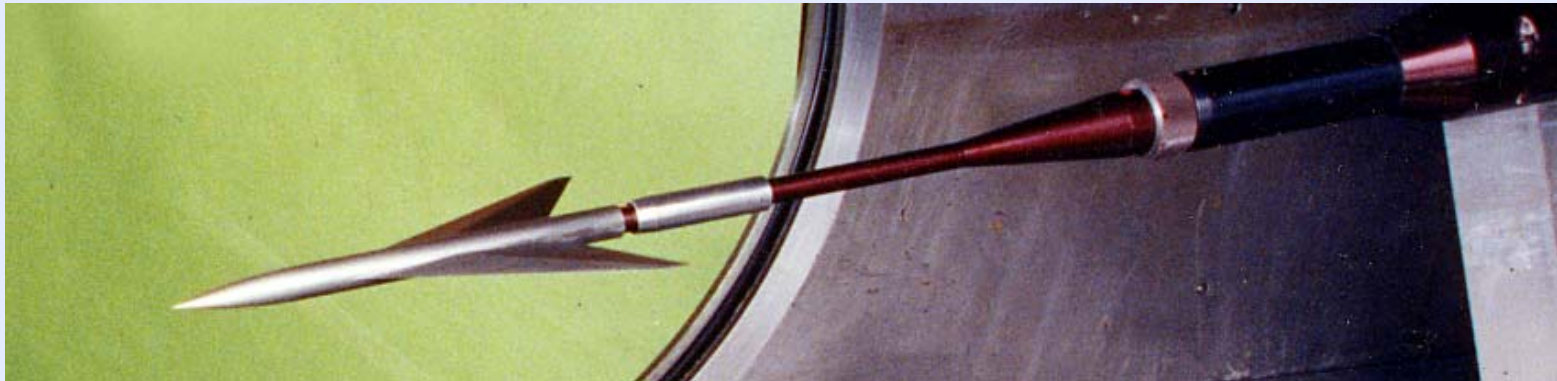
Mesure des efforts aérodynamiques

- ★ dispositif pour mesurer les composantes des efforts d'origine aérodynamique (torseur aérodynamique)

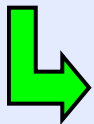


balance d'efforts aérodynamiques

- ★ la balance est montée sur le dard supportant la maquette



- ★ mesure des 6 composantes du torseur aérodynamique

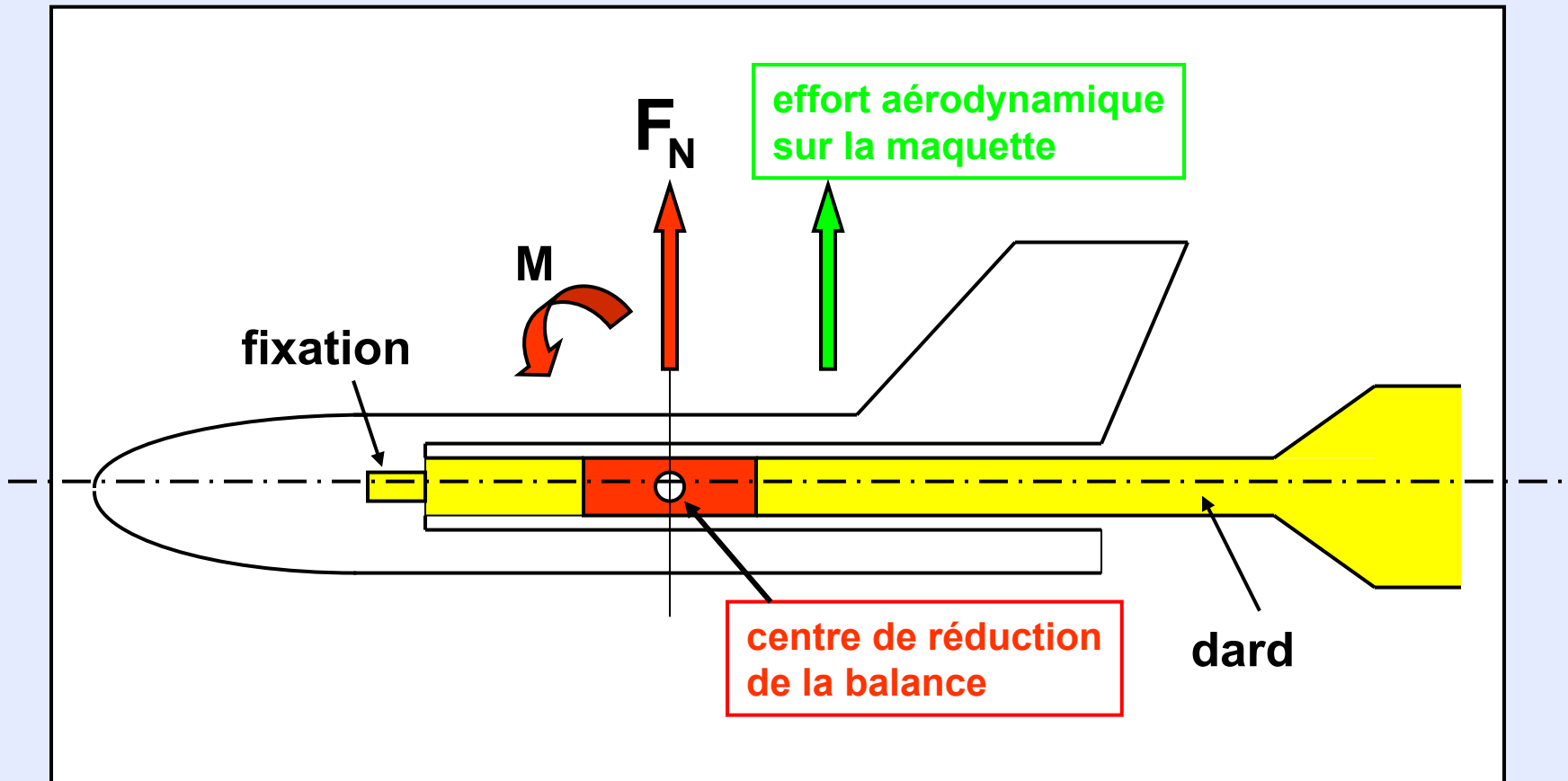


dynamomètres à jauges de contrainte

effort → déformation → effet jauge → signal électrique

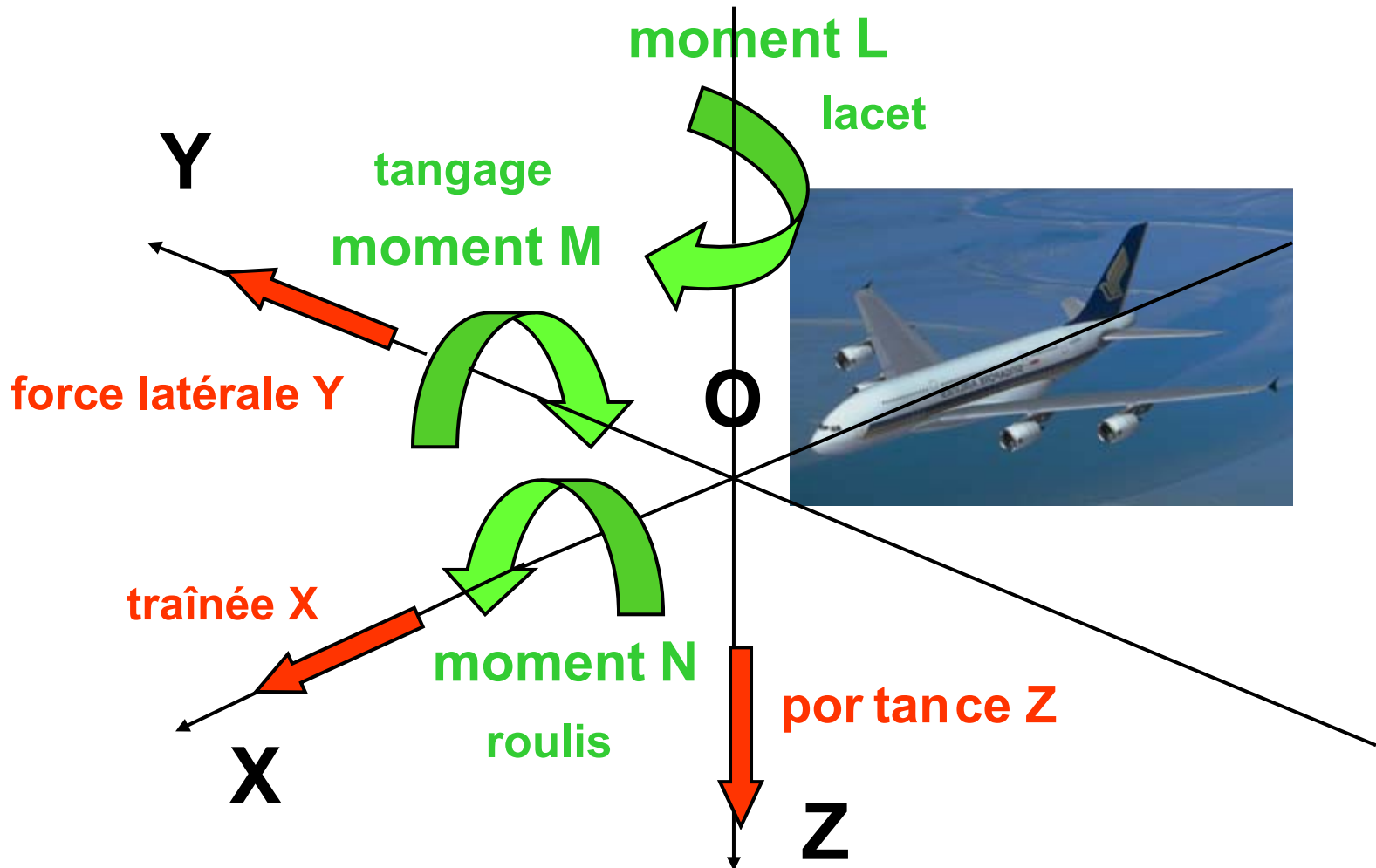
Efforts aérodynamiques

Constitution d'une balance aérodynamique

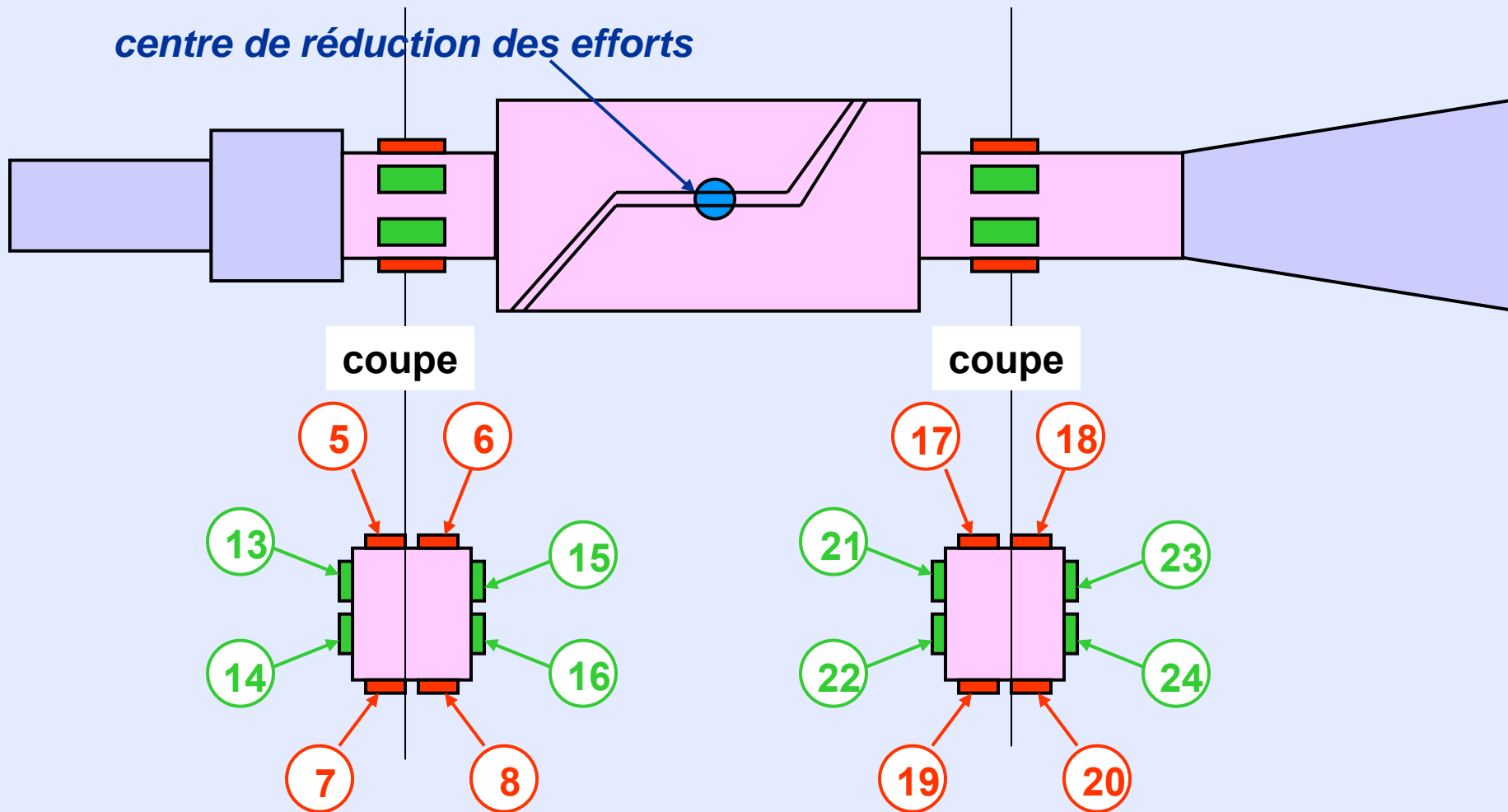


Efforts aérodynamiques

Forces et moments du torseur aérodynamique



Constitution d'une balance d'efforts aérodynamiques



- mesure de la portance Z et du moment de tangage M
- mesure de l'effort latéral Y et du moment de lacet L

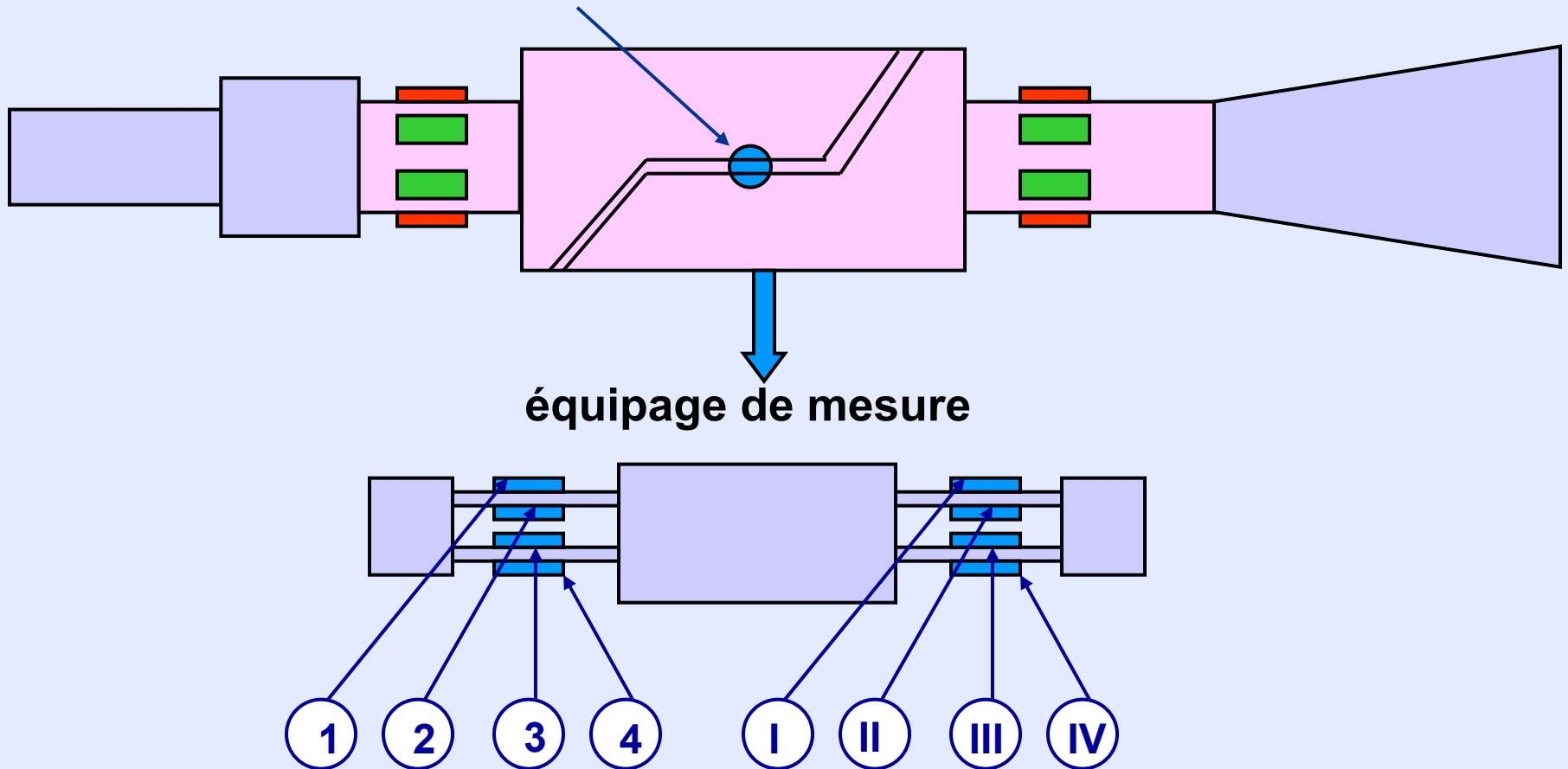
Efforts aérodynamiques

Constitution d'une balance d'efforts aérodynamiques



mesure de la force de traînée X

centre de réduction des efforts



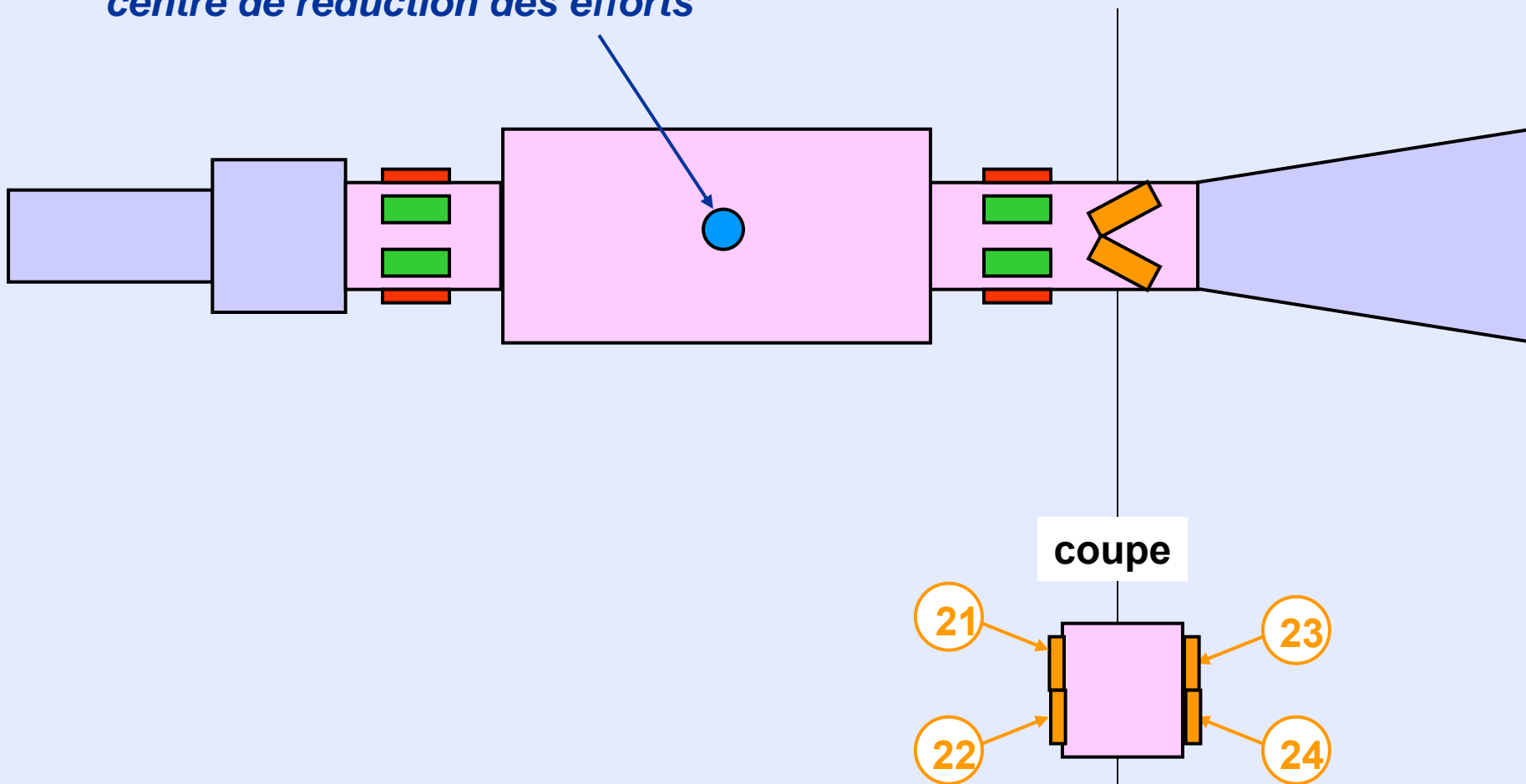
Efforts aérodynamiques

Constitution d'une balance d'efforts aérodynamiques



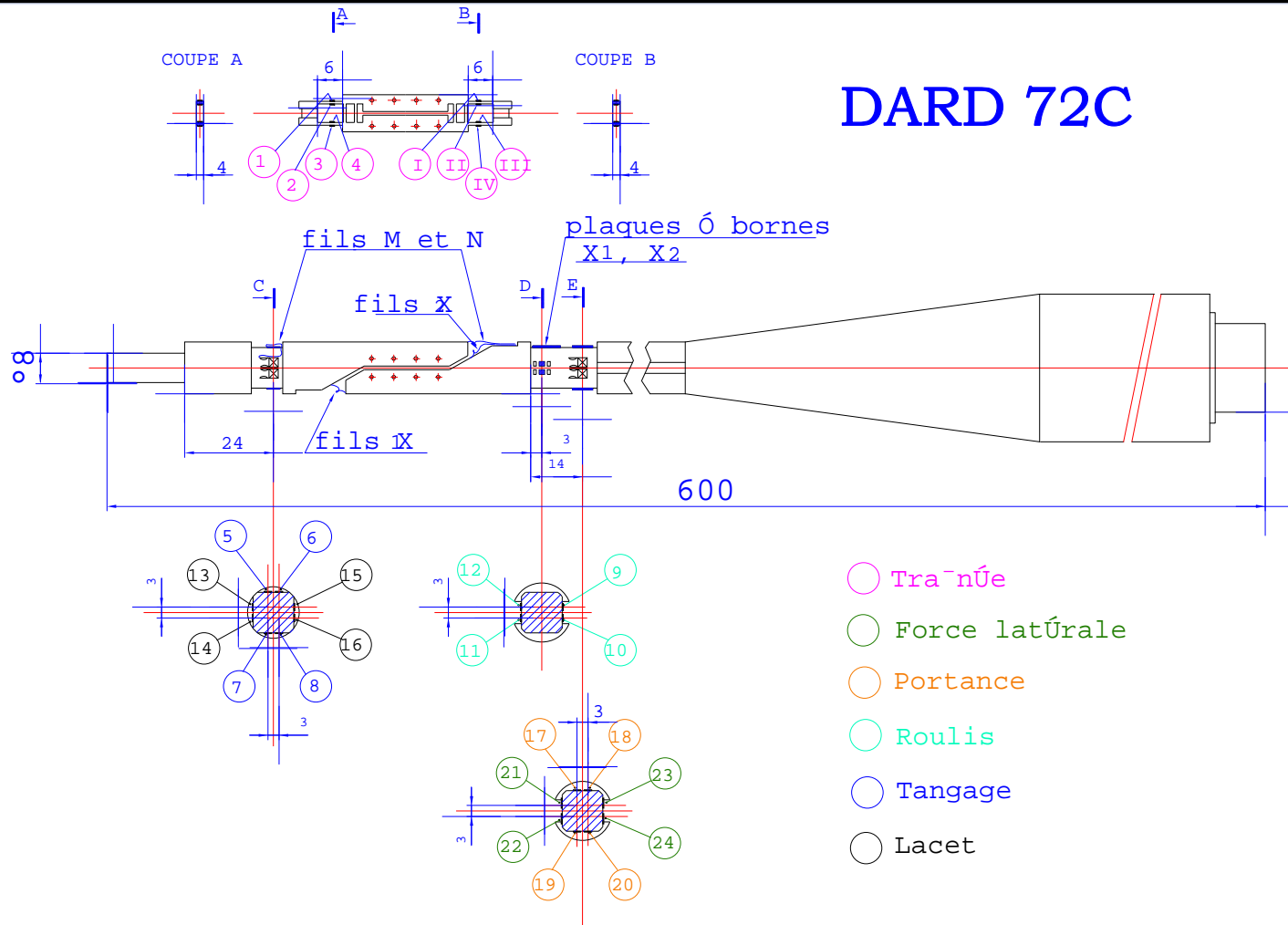
mesure du moment de roulis N

centre de réduction des efforts



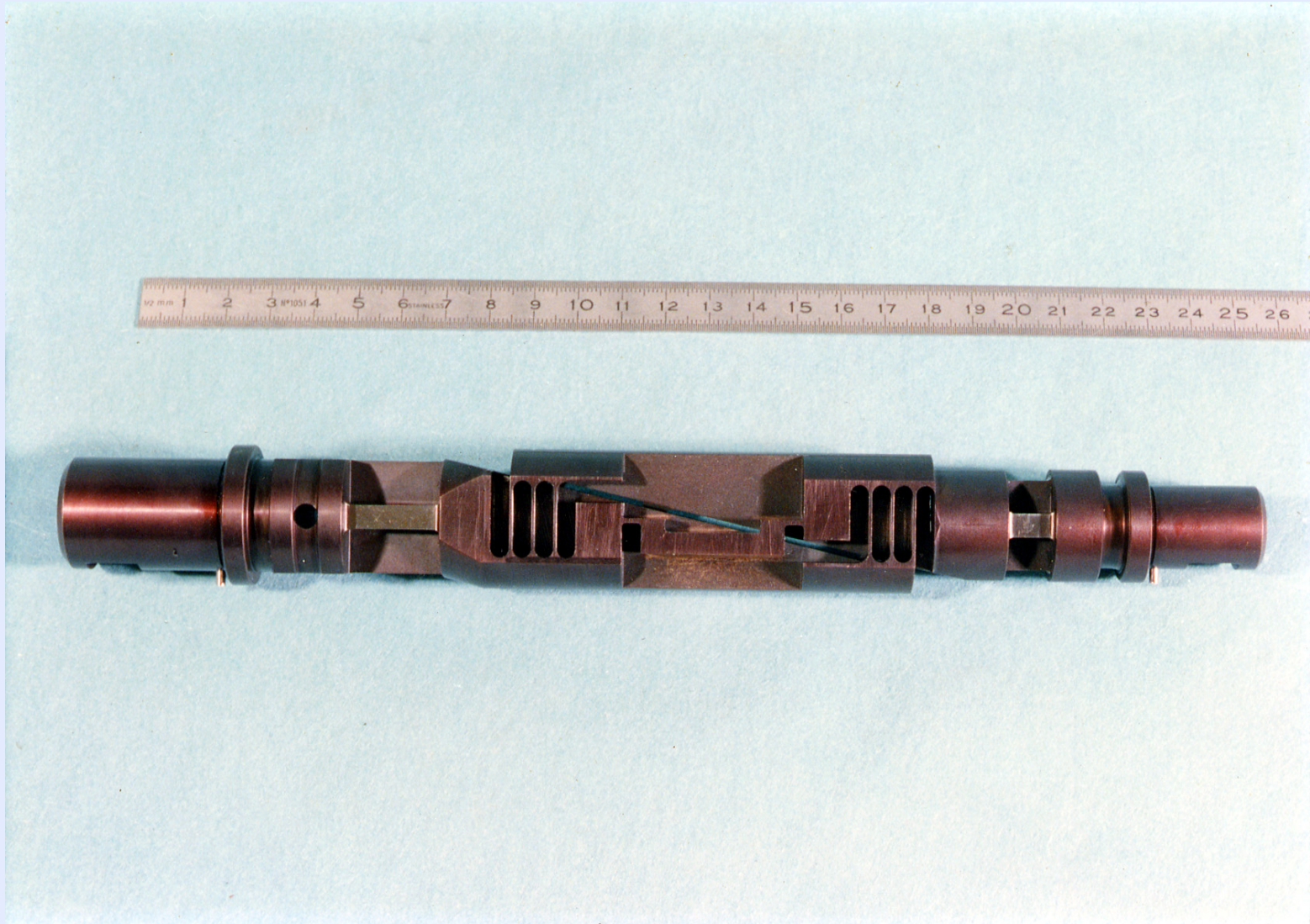
Efforts aérodynamiques

Balance dard ONERA 72C à six composantes



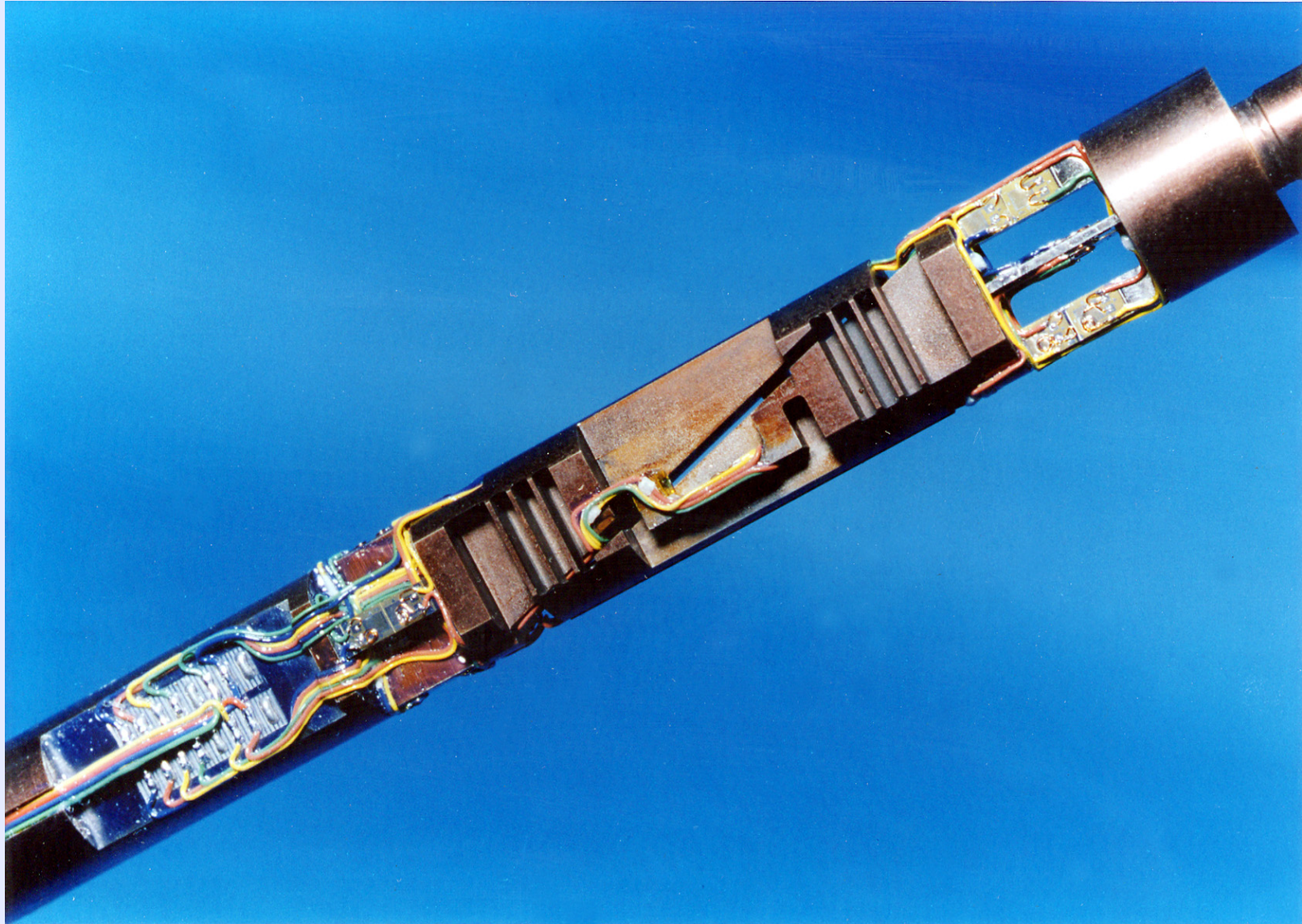
Efforts aérodynamiques

Balance dard ONERA à six composantes



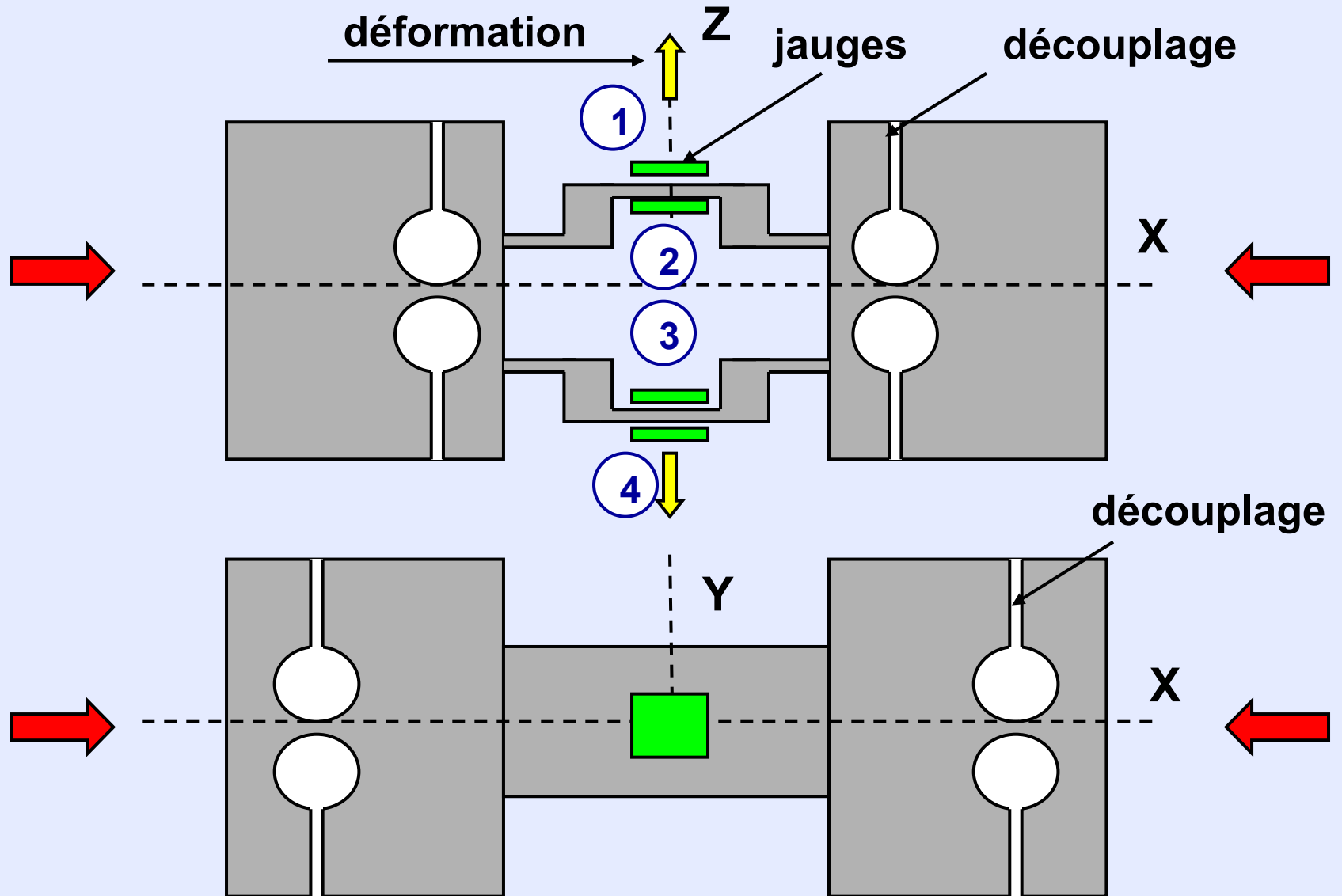
Efforts aérodynamiques

Balance dard ONERA à six composantes



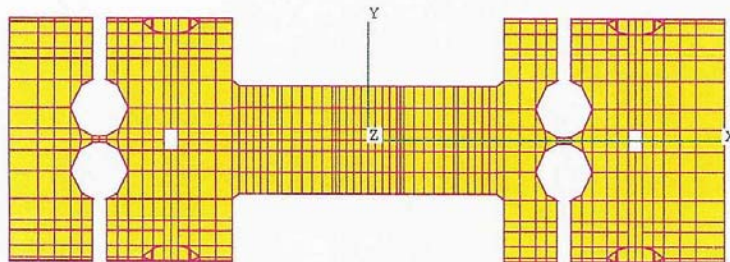
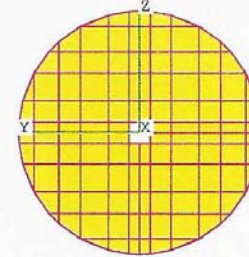
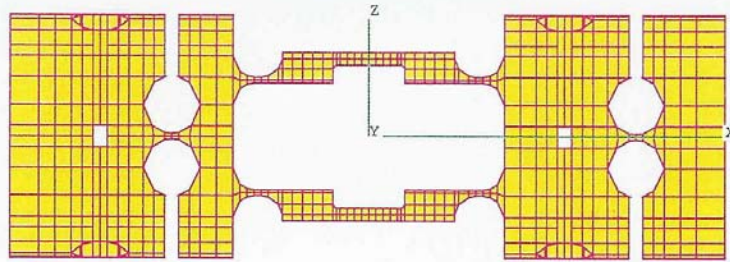
Efforts aérodynamiques

Dynamomètre pour force de traînée

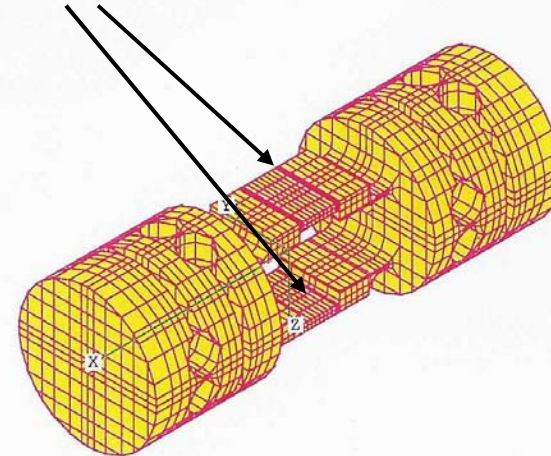


Efforts aérodynamiques

Dynamomètre pour force de traînée



jauges

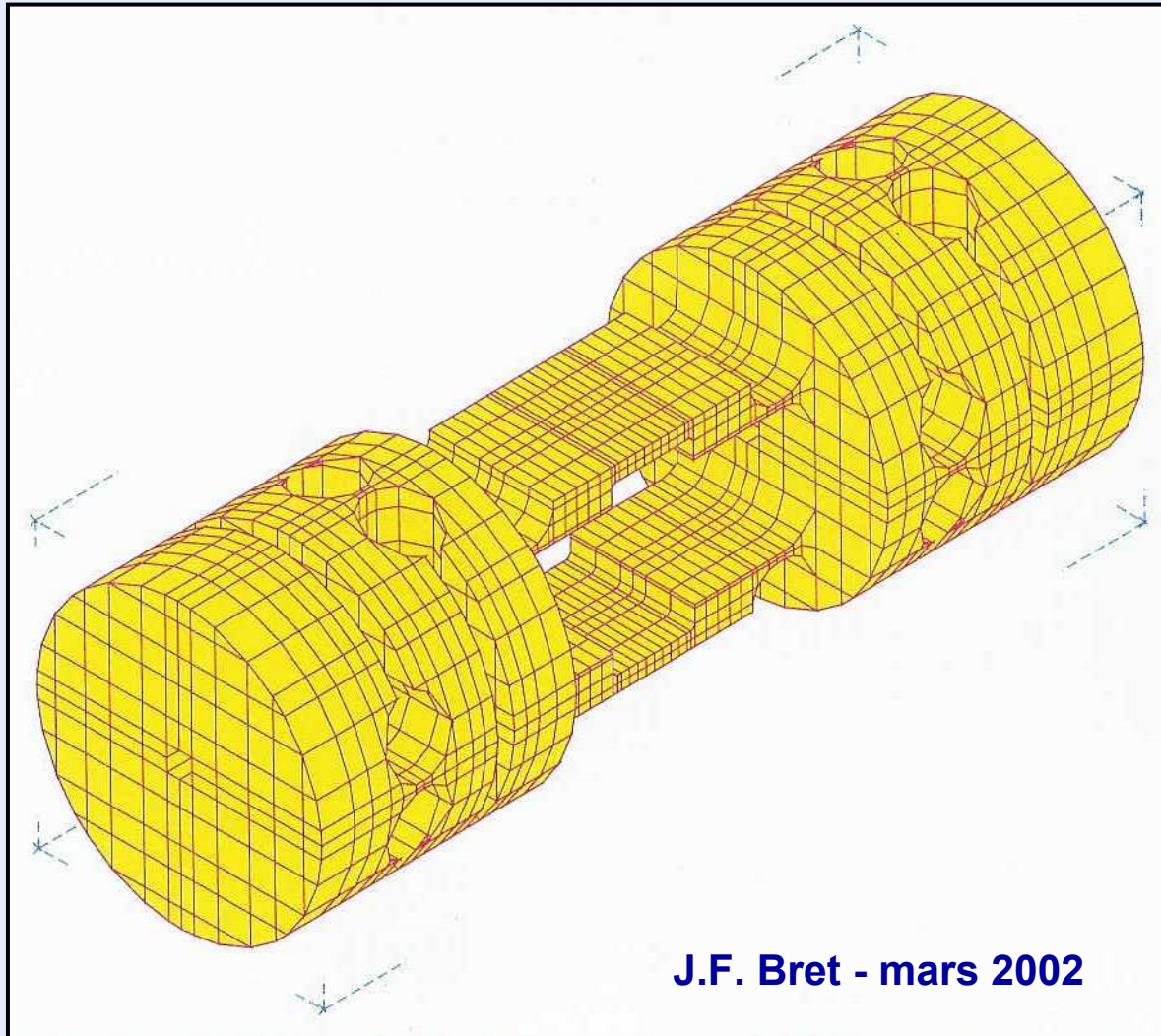


J.F. Bret - mars 2002

modélisation du dynamomètre de X

Efforts aérodynamiques

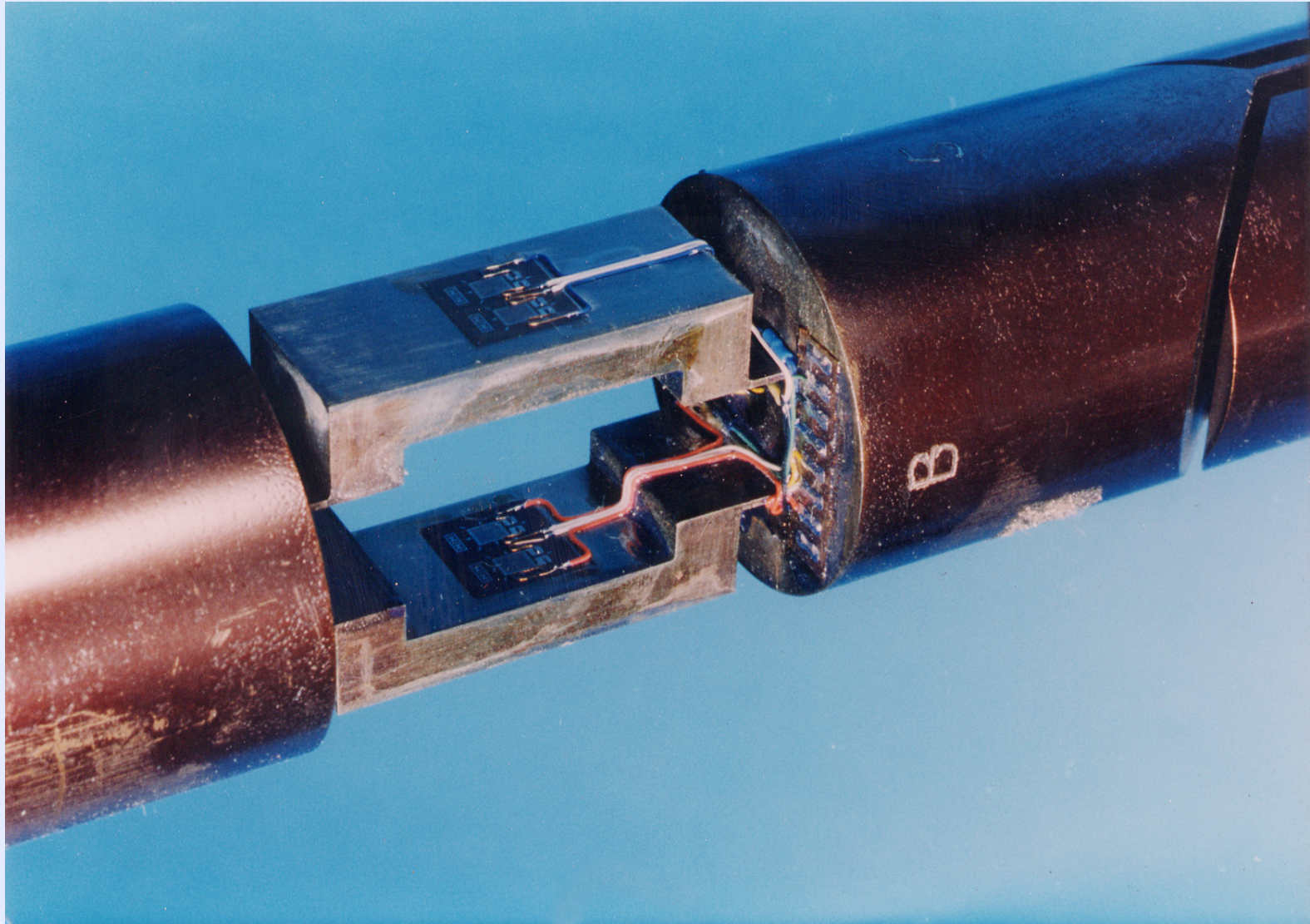
Dynamomètre pour force de traînée



modélisation du dynamomètre de X en vue isométrique

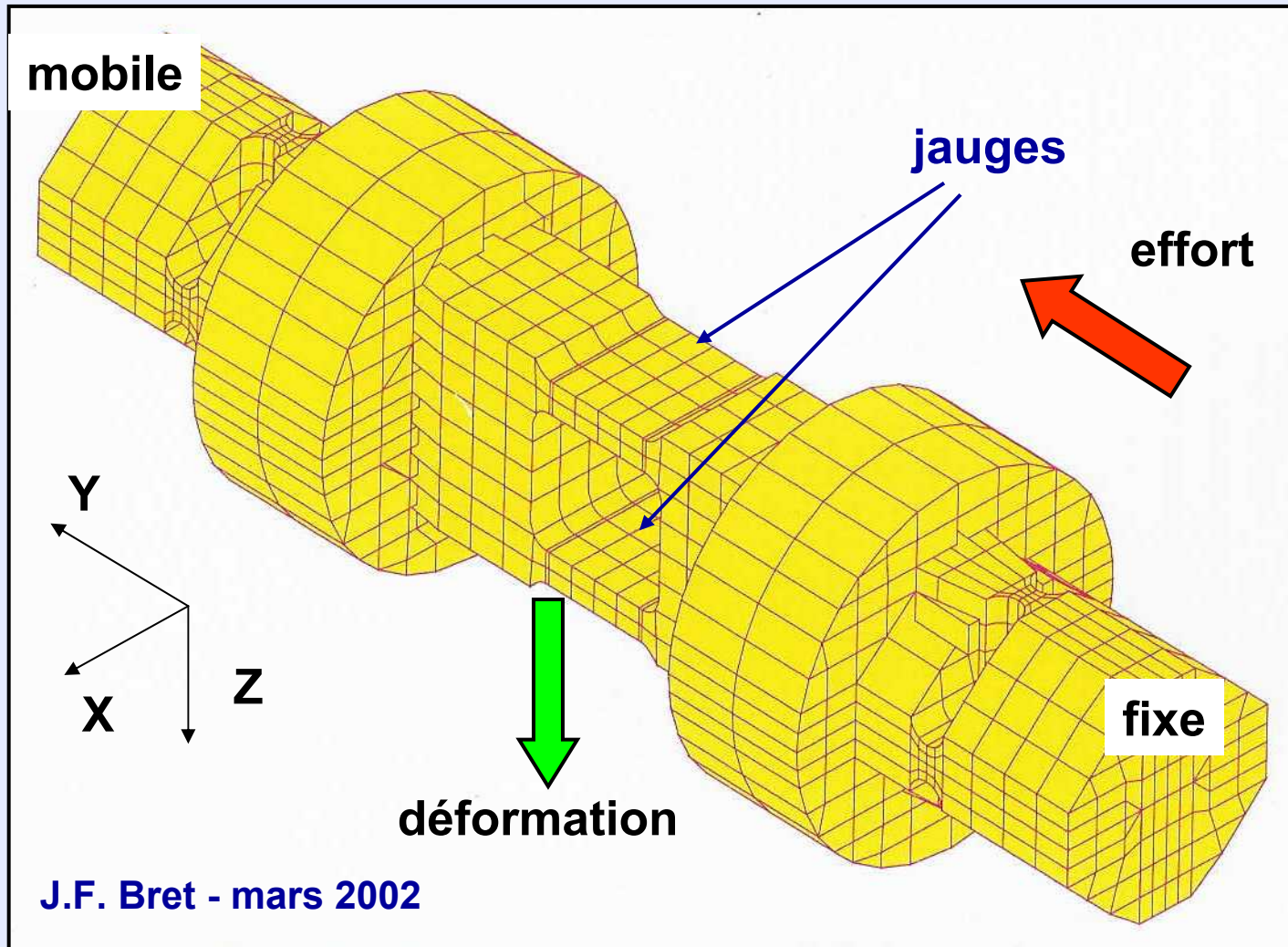
Efforts aérodynamiques

Dynamomètre pour force de traînée

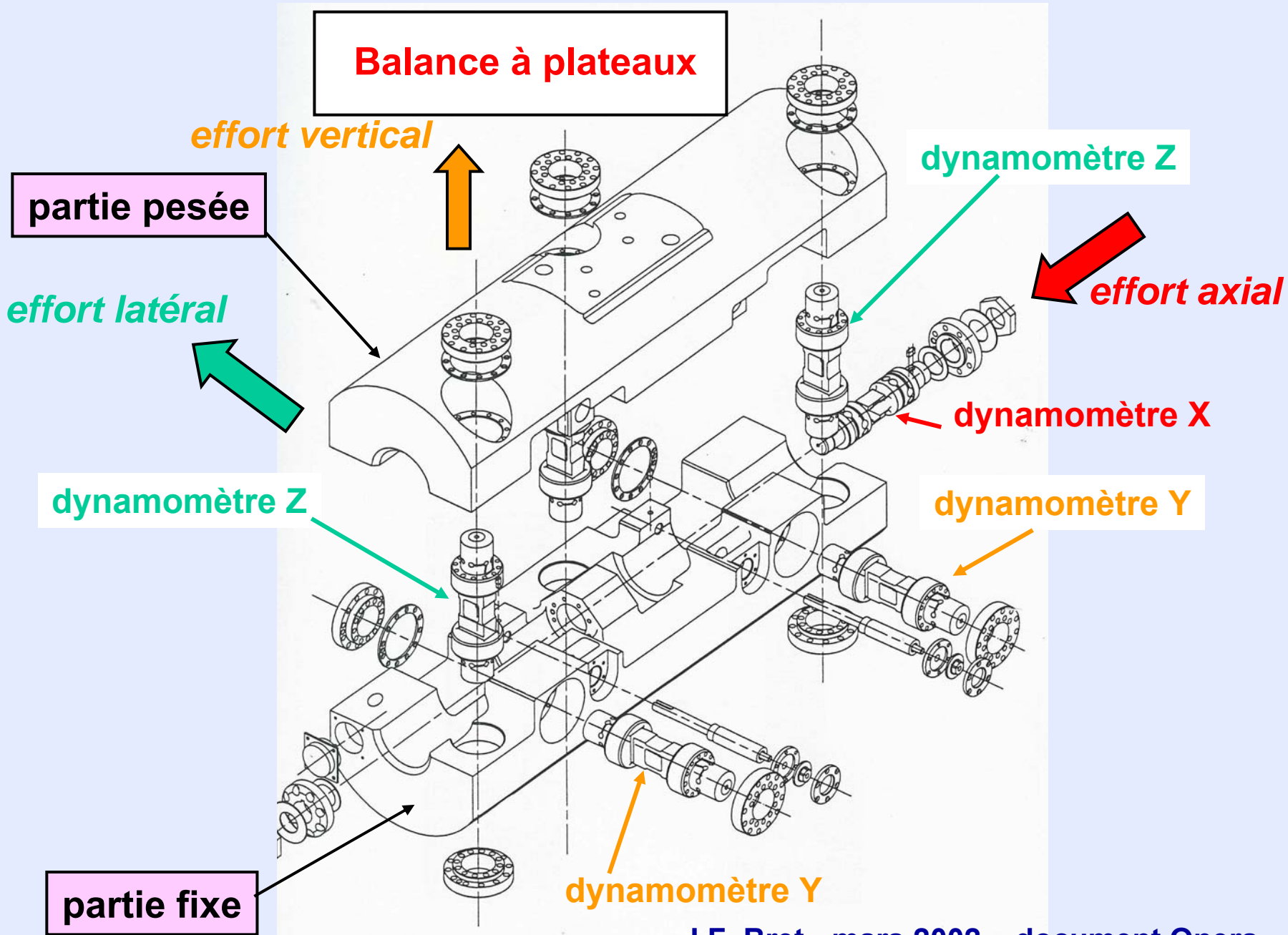


Efforts aérodynamiques

Dynamomètre pour efforts de portance et force latérale



modélisation du dynamomètre de Y (ou de Z par pivotement de 90°)



Méthodes de mesure en aérodynamique



**Étalonnage et utilisation des
balances aérodynamiques**

Dassault-Aviation *Falcon 50*

Efforts aérodynamiques

Étalonnage des balances aérodynamiques

Les balances sont affectées d'interactions (linéaires et quadratiques)

la réponse à une composante d'effort ou de moment est ressentie aussi par les autres ponts de jauges  **découplage imparfait**

exemple : l'application d'un effort de traînée X entraîne une réponse sur les ponts mesurant Y, Z, L, M, N

causes

- ★ erreurs d'ordre géométrique
- ★ dissymétrie d'usinage
- ★ écarts de positionnement des jauges
- ★ déformations élastiques

les balances doivent être étalonnées

Efforts aérodynamiques

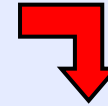
**Banc d'étalonnage
pour balance**



Efforts aérodynamiques

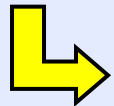
Étalonnage des balances aérodynamiques

principe  application d'efforts connus



mesure des signaux électriques délivrés par les ponts de jauges

signal σ_p d'un pont



$$\sigma_p = \sum_{n=1}^{n=6} A_n^p X_n + \sum_{m=1}^{m=6} \sum_{l=1}^{l=6} B_p^{ml} X_m X_l$$

6 coefficients linéaires A et 21 coefficients quadratiques B

pour la balance complète

 36 coefficients linéaires A et 126 coefficients quadratiques B

Efforts aérodynamiques

Étalonnage des balances aérodynamiques

méthode d'étalonnage → application de 21 cas de charges

6 cas simples

15 combinaisons deux à deux

Charges simples	Charges composées					
X		XY	XZ	XL	XM	XN
Y			YZ	YL	YM	YN
Z				ZL	ZM	ZN
L					LM	LN
M						MN
N						

6 cas simples → 2×36 coefficients linéaires A_p^n et B_p^{mm}

15 combinaisons → 90 coefficients quadratiques B_p^{ml}

Efforts aérodynamiques

Étalonnage des balances aérodynamiques

mesures en soufflerie

à partir des signaux σ_p des ponts de jauges et des coefficients inverses a_n^p et b_n^{qr}

 détermination des composantes des efforts

$$\mathbf{x}_n = \sum_{p=1}^{p=6} \mathbf{a}_n^p \sigma_n + \sum_{q=1}^{q=6} \sum_{r=1}^{r=6} \mathbf{b}_n^{qr} \sigma_q \sigma_r$$

Efforts aérodynamiques

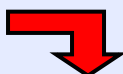
Étalonnage des balances aérodynamiques

Exemple de matrice d'étalonnage d'une balance à 6 composantes

termes linéaires seulement

Ponts de jauges		X	Y	Z	L	M	N	
Linéaires A	p	1	2	3	4	5	6	
	X	1	+118,5	0	0	0	0	
	Y	2	+0,084	+19,55	+0,075	+0,022	-0,096	-0,124
	Z	3	-2,61	-0,010	+11,47	-0,156	+0,053	0
	L	4	+1,5	+2	+1	+253	-2	-5,1
	M	5	-4,4	-0,68	-0,28	-1,72	+190,62	+0,34
N	6	-1,6	-7,4	+2,7	-0,6	-0,6	+285,7	

si découplage parfait



seuls les coefficients de la diagonale principale seraient non nuls



MÉTHODES DE MESURE EN
AÉRODYNAMIQUE

Mesures des efforts
fin de la leçon