EUROBALLISTICS

3ème CONGRÈS
de
BALISTIQUE LÉSIONNELLE

LA BALISTIQUE DES PROJECTILES

Analyse - Aspects théoriques et pratiques

Jean-Jacques DORRZAPF

- La définition rigoureuse est “réductionniste“

  « Science du mouvement des projectiles et des engins uniquement soumis aux lois de la gravitation » (Le Petit Robert)

- En pratique

  Le terme “balistique“ est utilisé pour étudier l’ensemble des phénomènes auxquels est soumis le projectile, du départ du coup jusqu’à la fin de son interaction avec la cible

- Nécessité de subdiviser la balistique

  En trois ou quatre catégories : intérieure, extérieure (+ intermédiaire) et terminale

Balistique

- Les subdivisions de la balistique :
  - La balistique intérieure des armes
    Ce qui se passe dans le canon de l'arme
  - La balistique intermédiaire
    Ce qui se passe à la bouche de l'arme
  - La balistique extérieure
    Le projectile n'est plus dans les turbulences de la bouche de l'arme. Il se dirige (en principe) vers la cible
  - La balistique terminale
    Étude de l'interaction du projectile avec la cible

BALISTIQUE

Jean-Jacques DÖRRZAPF

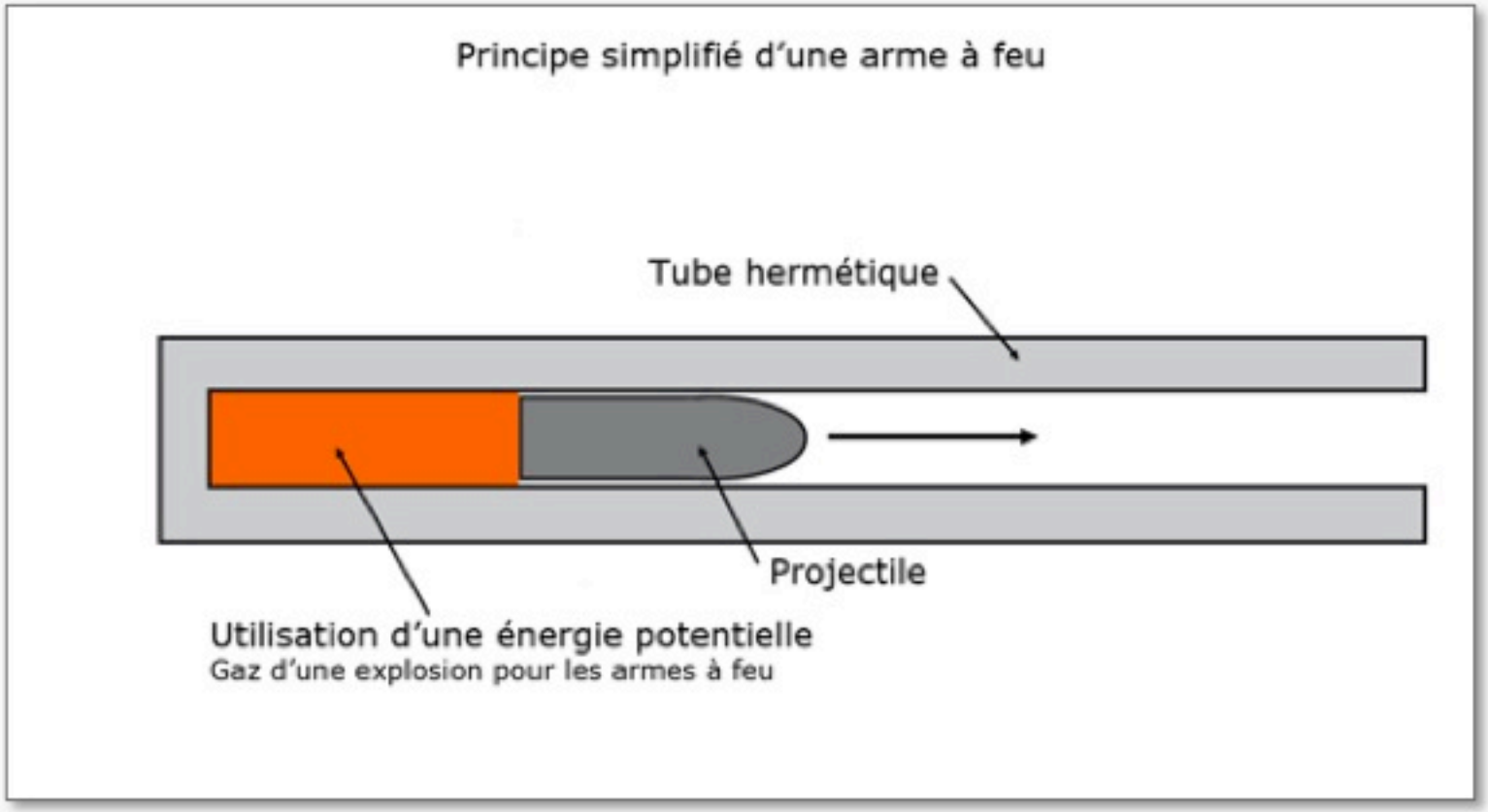
EUROBALLISTICS

3ème CONGRÈS
de
BALISTIQUE LÉSIONNELLE

LA BALISTIQUE INTÉRIEURE

Jean-Jacques DÖRRZAPF

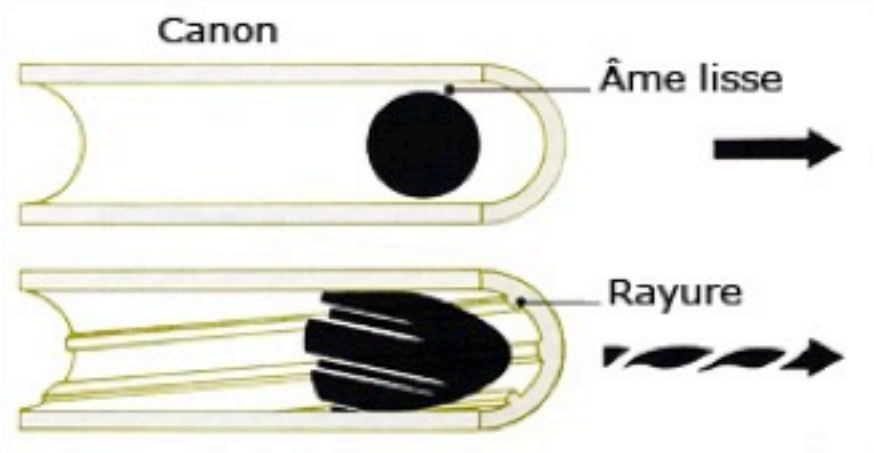
➢ Qu'est qu'une arme à feu ?



☞ Le projectile est un piston, assurant l'étanchéité avec la paroi interne du tube, mû par un gaz très chaud à haute pression

Balistique intérieure

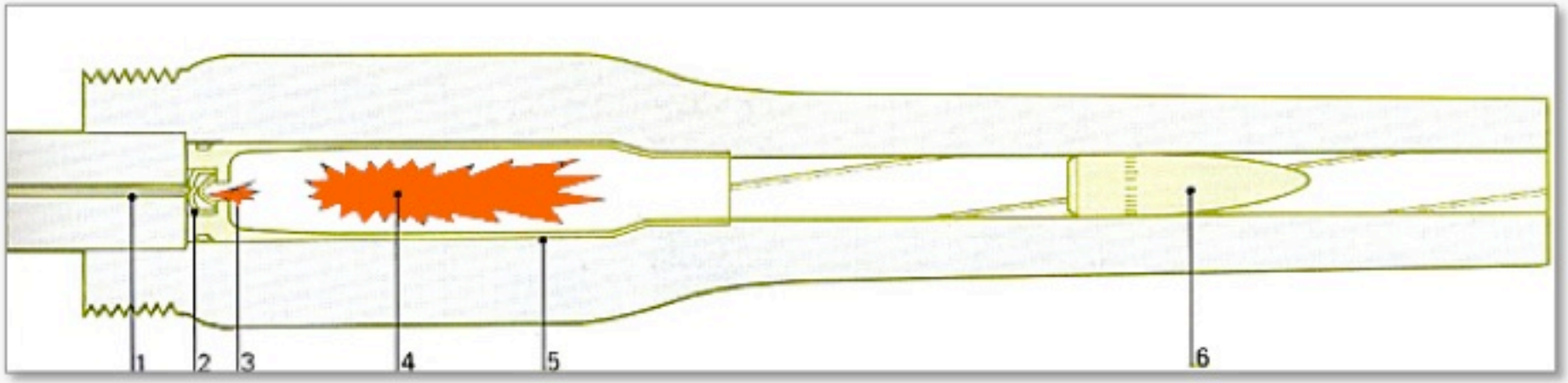
- Deux principaux types de canons



Canons à âme lisse : chasse par exemple (peu de précision au tir)

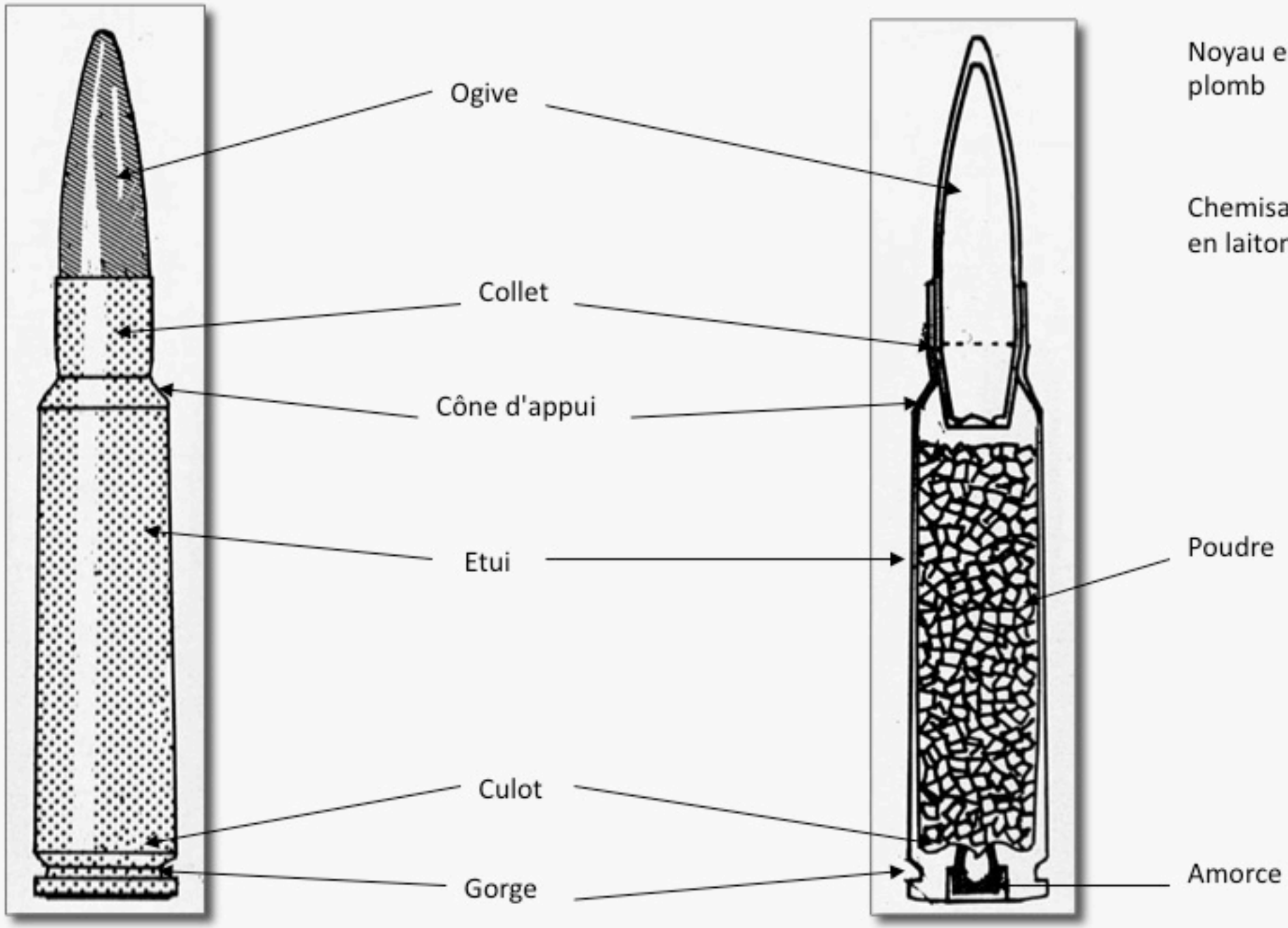
Canons à âme rayée : stabilisation gyroscopique du projectile profilé (bien meilleure précision)

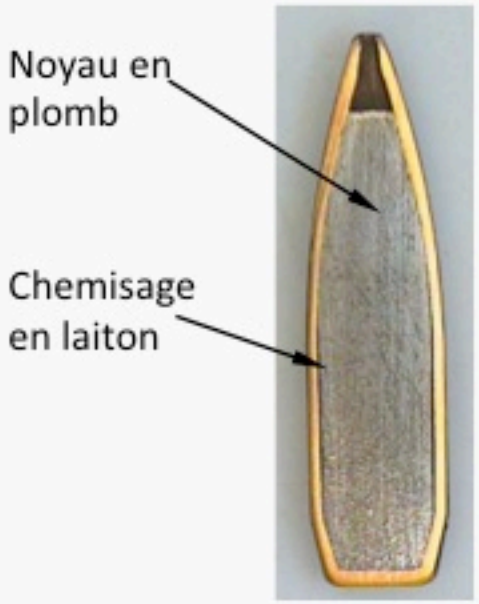
Coupe schématique d'un canon et de la chambre



1 : culasse et percuteur ; 2 : amorce ; 3 : gaz produits par l'amorce ; 4 : gaz produits par la combustion de la poudre ; 5 : étui ; 6 : projectile

➢ Schéma d'une cartouche





➢ Quelques types de cartouches pour armes de poing

➢ Quelques cartouches pour armes d'épaule

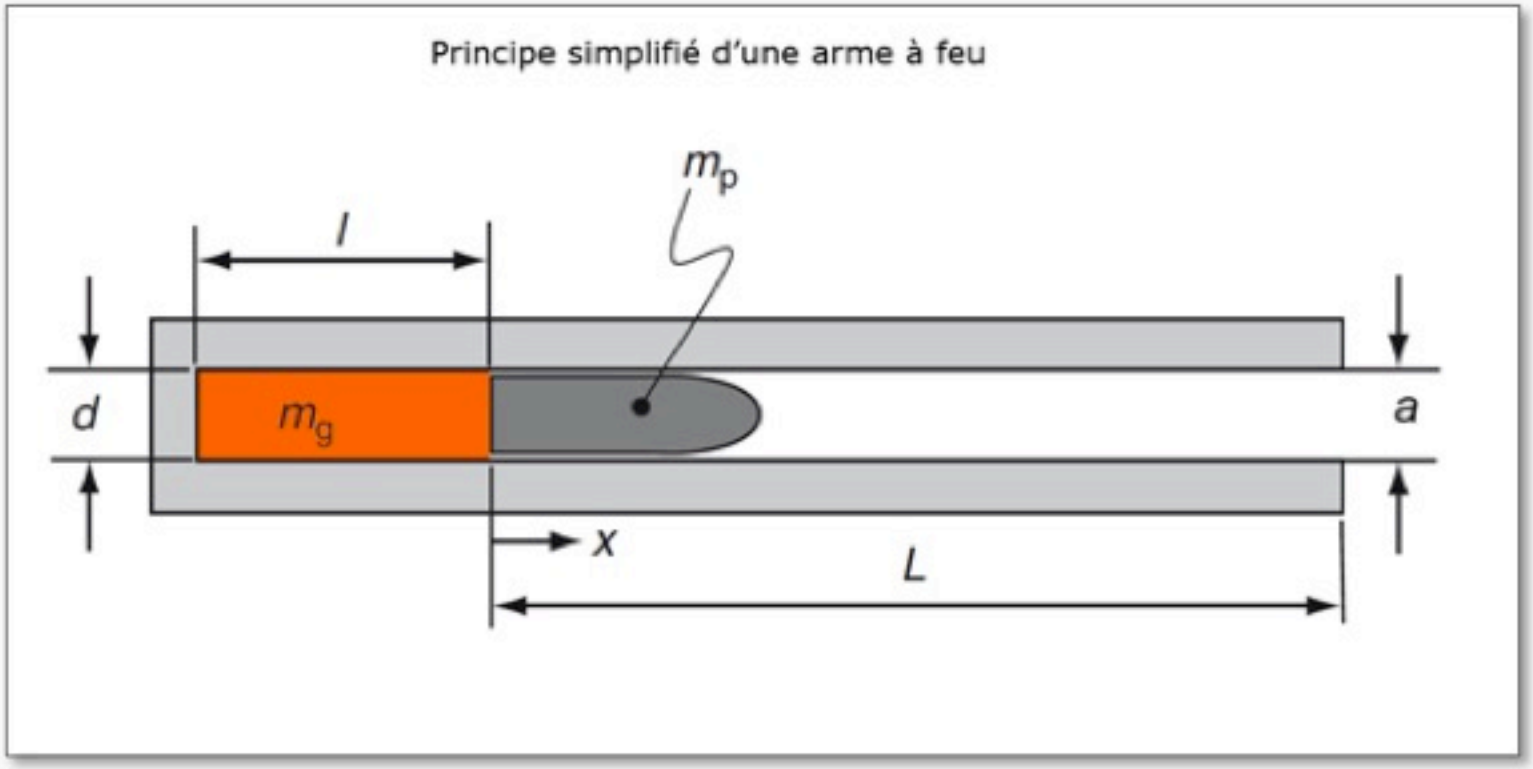
.308
7,62 x 51 mm

.223 Remington
5,56 x 45 mm

7,62 x 39 mm
AK 47

5,45 x 39 mm
AK 74

- Paramètres caractéristiques d'une arme à feu simplifiée



d : diamètre de la " chambre" ; m_g = masse des gaz ; m_p = masse du projectile ; x = position du projectile ; L = longueur du tube ; a = calibre de l'arme

➢ Facteurs déterminant la vitesse d'un projectile

☞ Newton -> Deuxième loi de la dynamique

$$F_p = m_p \frac{dV_p}{dt} = m_p V_p \frac{dV_p}{dx_p} = p_p A$$

Avec $V = \frac{dx}{dt} \Rightarrow dt = \frac{dx}{V}$

m = masse du projectile ;
V_p = vitesse du projectile ;
p_p = pression au culot du projectile ;
A = section du culot du projectile ;
$\bar{p}$ = pression moyenne

$$\Rightarrow \quad m_p V_p \frac{dV_p}{dx_p} = p_p A$$

$\Rightarrow$ *Intégration ->* $m_p \int V_p dV_p = A \int p_p dx_p$

$\Rightarrow$ Énergie cinétique du projectile $\frac{1}{2} m_p V_p^{\ 2} = A \int p_p dx_p$ travail fourni par la pression

Soit la pression moyenne $\bar{p} \equiv \frac{1}{L} \int_0^L p_p dx_p \Rightarrow$

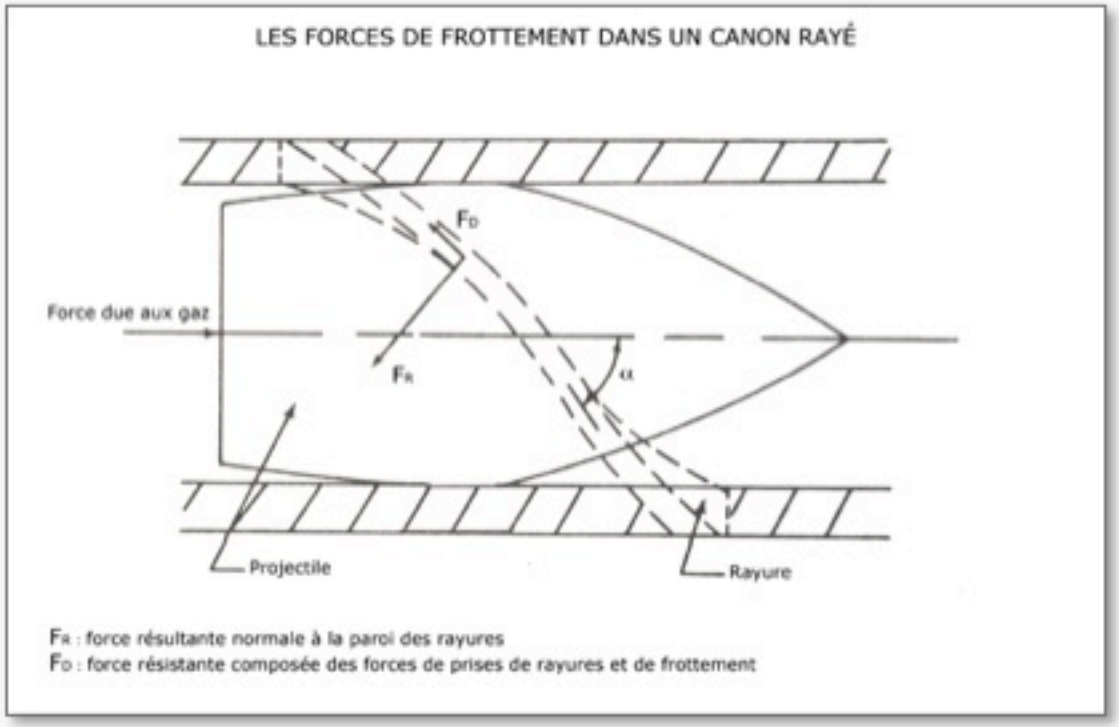
$$V_p = \sqrt{\frac{2\bar{p}AL}{m_p}}$$

Limites
- L ne peut pas être aussi grand que l'on veut ($F_p \geq F_R$);
- m ne peut pas être aussi petit que l'on veut.

➢ Bilan des forces de résistance à l'avancement du projectile

✓ Les forces de frottement

- Force nécessaire à la prise de rayure
- Force de frottement, métal-métal, due au mouvement du projectile dans le tube
- Force de frottement normale à la paroi des rayures (pour les canon rayés)



$$\text{Vitesse de rotation en rd.s}^{-1} = \frac{\text{Vitesse du projectile en m.s}^{-1}}{\text{Pas des rayures en m}} \times 2\pi$$

ou

$$\omega = 2\pi \frac{v_0}{a} tg\theta$$

✓ Les forces d'inertie

Elles sont dues à la masse et aux dimensions du projectile

- Force nécessaire à l'accélération linéaire du projectile ;
- Force nécessaire à l'accélération angulaire (pour les canons rayés) du projectile.

Pour les canons rayés, on combine les deux forces d'inertie (déplacement et rotation) en introduisant une masse équivalente μ :

telle que $$\mu = m\left(1 + \frac{4\mathbf{I}}{ma^2} tg^2\alpha\right)$$

m = masse du projectile ;
$\mathbf{I}$ = moment d'inertie du projectile ;
α= angle des rayures par rapport à l'axe du canon ;
a = calibre du canon

➢ Équation des forces :

$$F_{Gaz} - (F_D + F_R) = \mu a$$

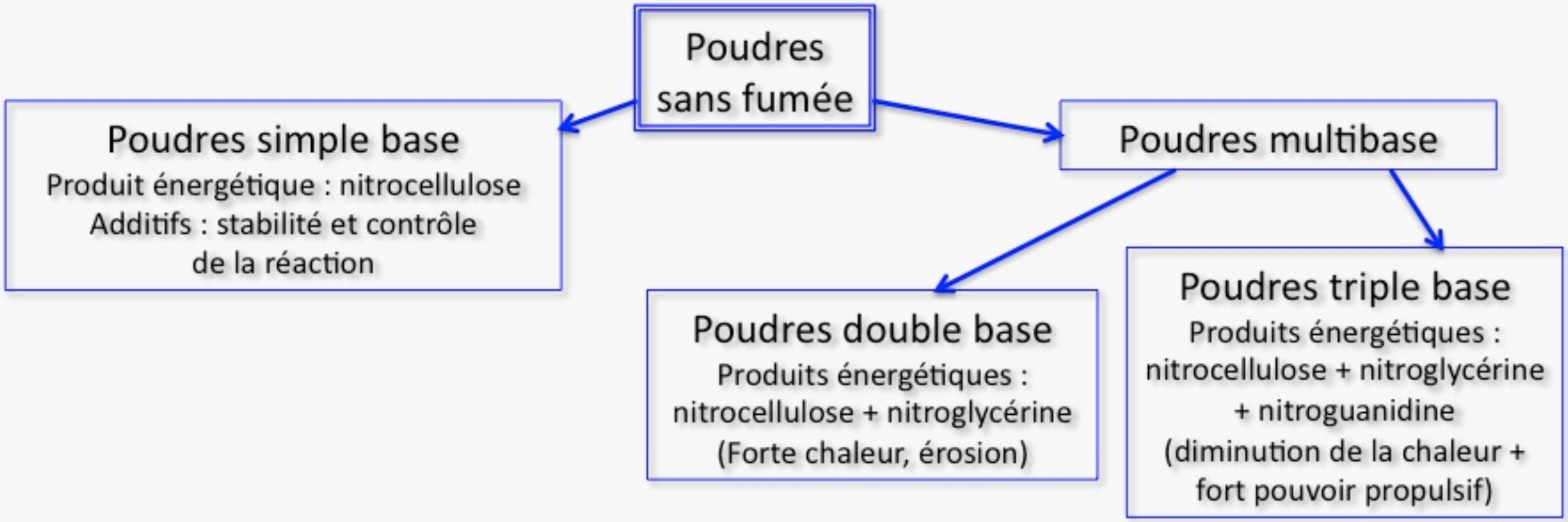
a = accélération du projectile

➢ Élément propulseur : les gaz

☞ Ils sont obtenus par combustion rapide d'une substance explosive, la "poudre", selon un régime de déflagration qu'il est essentiel de bien maitriser -> gaz très chaud à haute pression

✓ Les poudres sans fumée

Les "poudres sans fumée" ont remplacé la poudre noire malaisée à utiliser
Cependant, ce ne sont pas vraiment des poudres et elles ne sont pas vraiment sans fumée



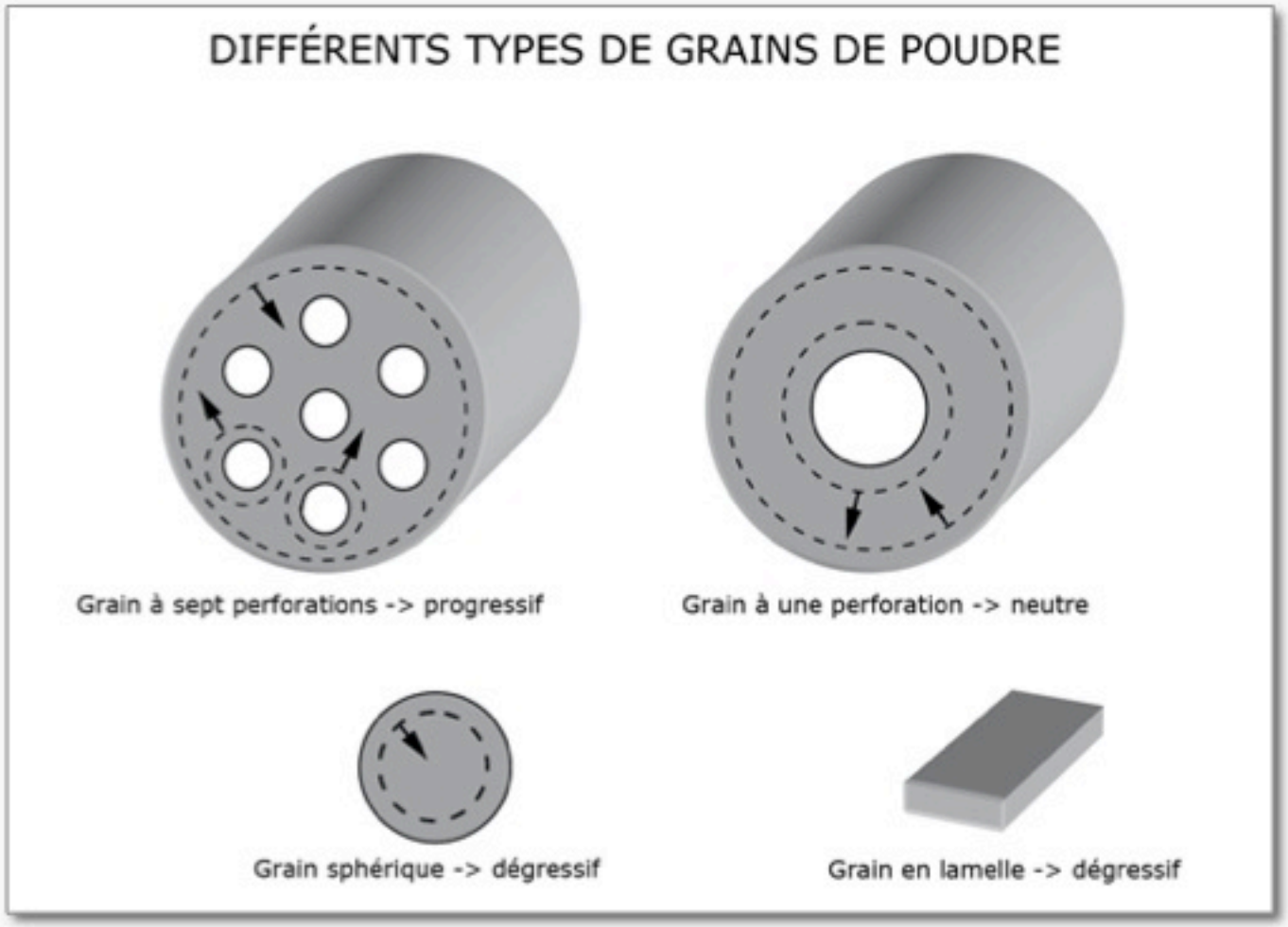
➢ Maîtrise du dégagement gazeux

☞ Les gaz se dégagent à la surface "S" des grains de poudres

☞ Outre la nature de la poudre, leur forme détermine la quantité de gaz émis et la pression dans l'arme

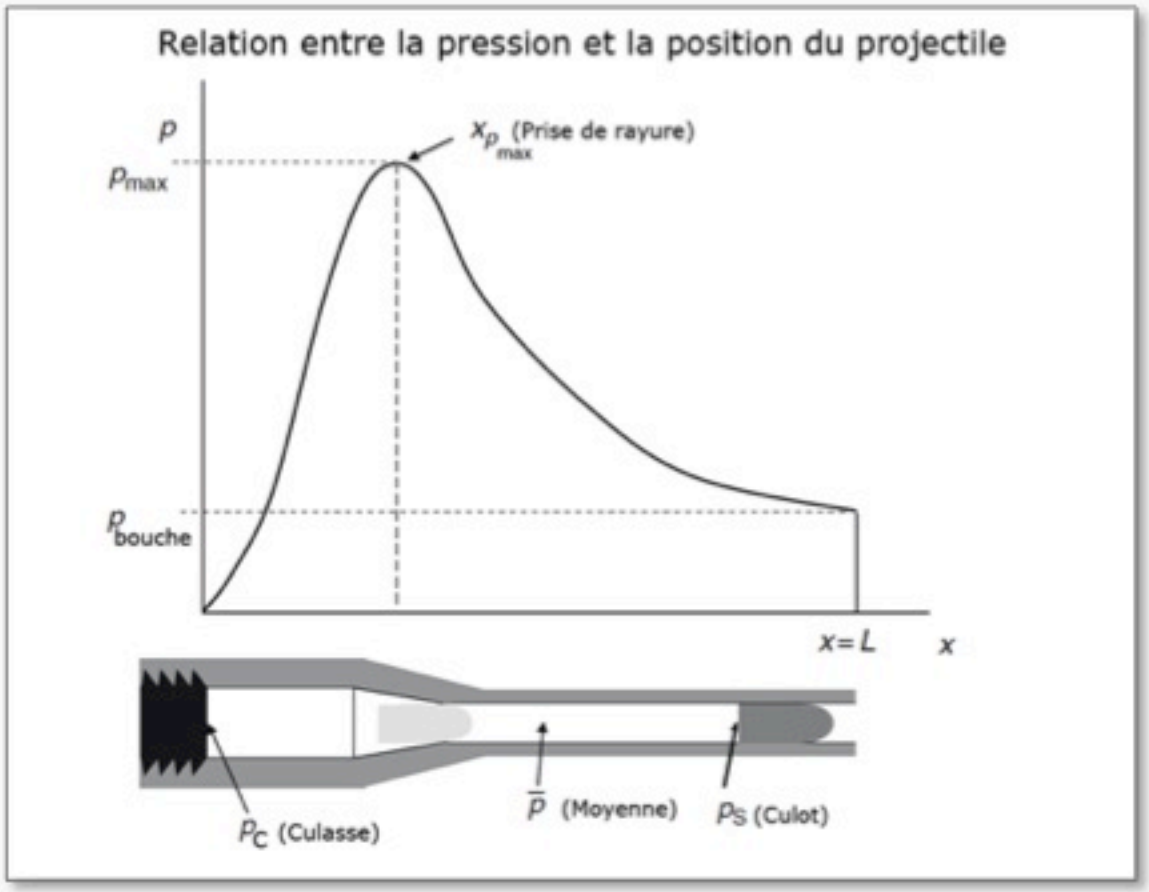
Au cours de la combustion

- Si "S" croît -> poudre progressive
- Si "S" stable -> poudre neutre
- Si "S" décroît -> poudre dégressive



➢ Les contraintes dans le canon

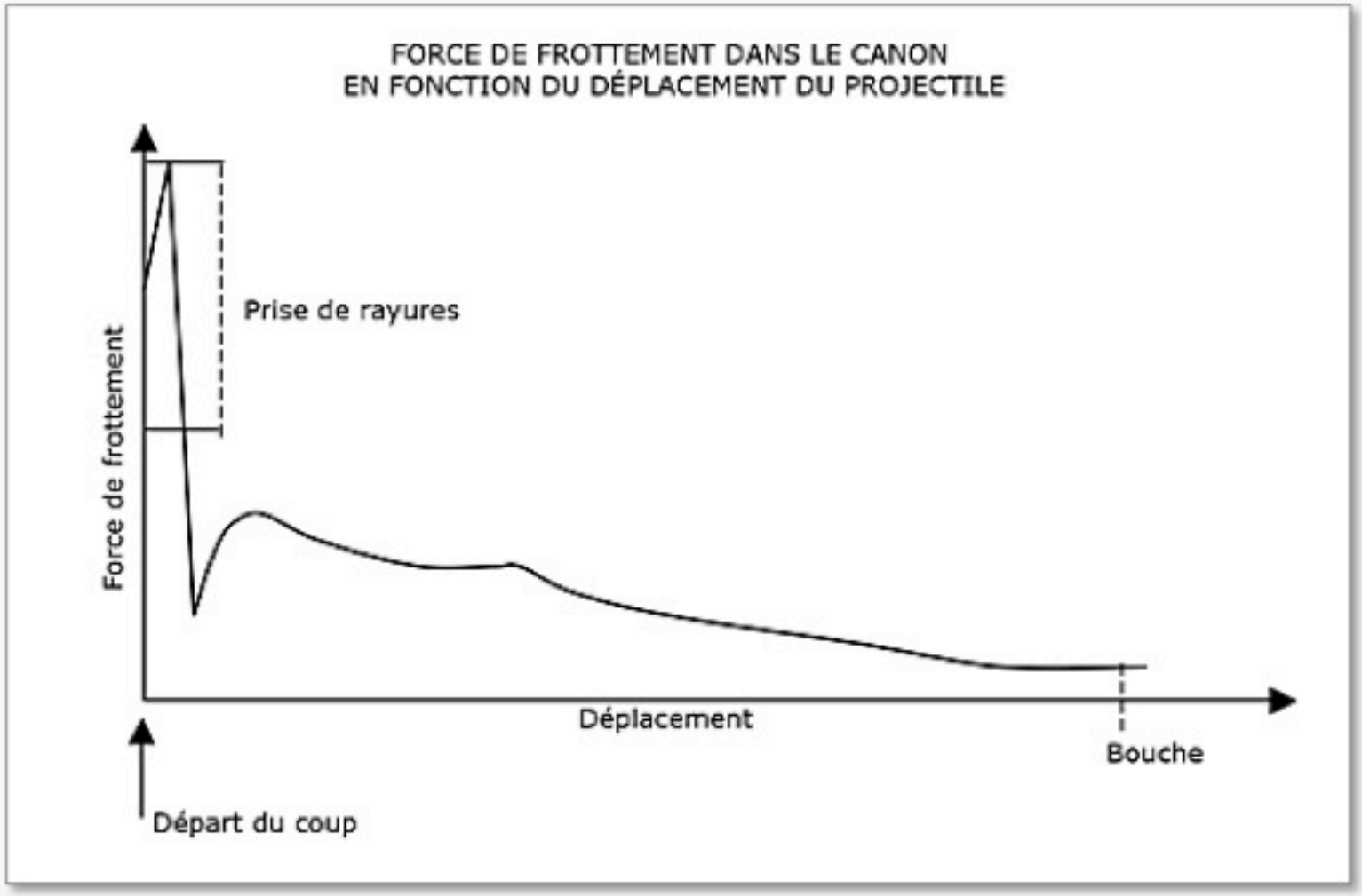
✓ Variation de pression selon la position du projectile



<u>Exemples :</u>

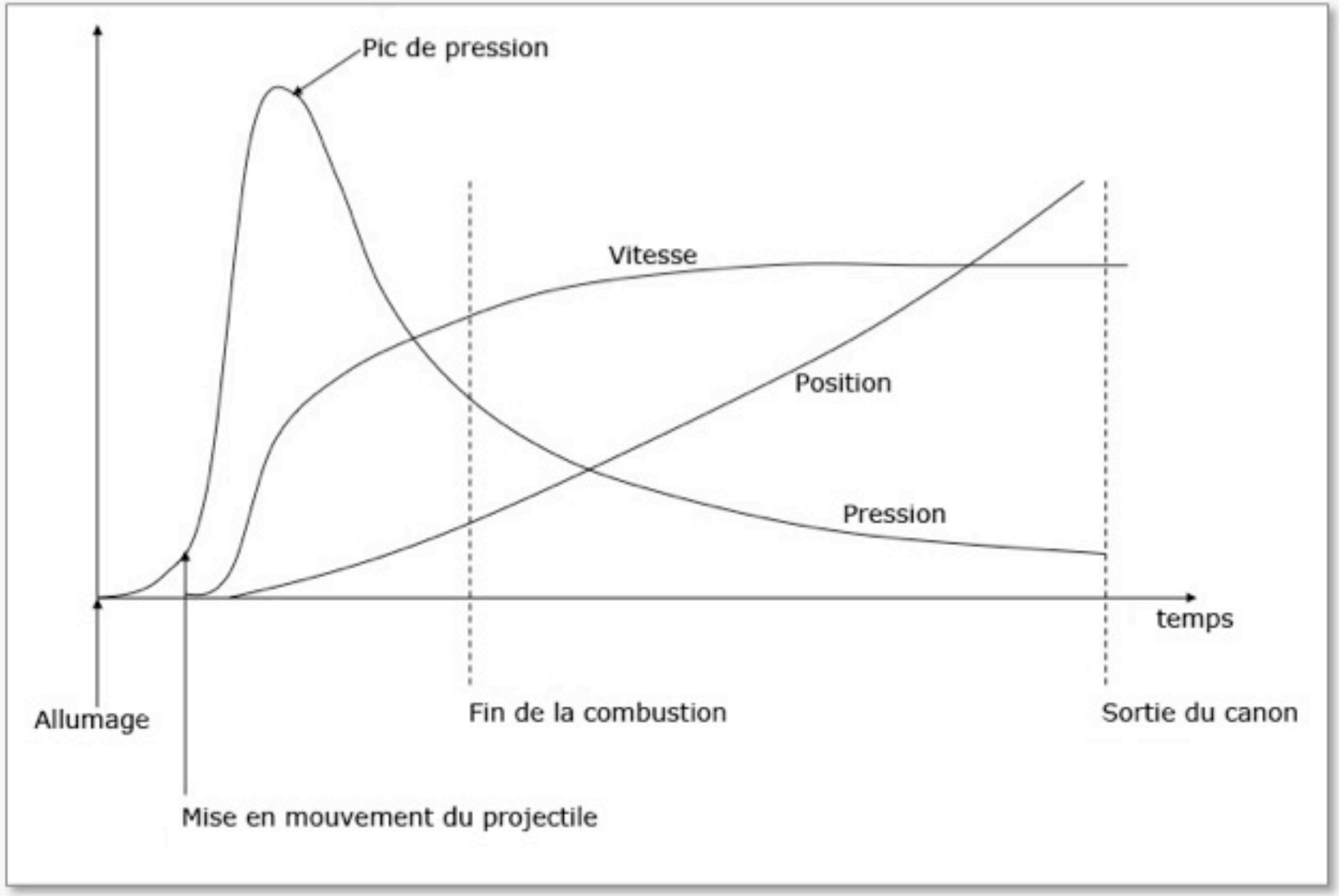
- pour le calibre 5,56x45 mm le pic de pression est ≈ 354 Mpa (≈3540 bars)
- Pour le calibre de 120 mm, la pic de pression est ≈ 425 Mpa (≈ 4250 bars)

✓ Les contraintes mécaniques dues aux frottements



Balistique intérieure

✓ Relation pression, vitesse et position du projectile en fonction du temps



➢ Énergie cinétique du projectile et des gaz

☞ Influence directe sur le potentiel lésionnel de la munition

- Énergie cinétique du projectile

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_g \Rightarrow m_p dV_p = F_g dt \Rightarrow m_p V_p dV_p = F_g dx$$

$$m_p \int V_p dV_p = \overline{F_g} \int_0^L dx \Rightarrow \frac{1}{2} m_p V_p^2 = \overline{F_g} L$$

m_p = masse du projectile
V_p = vitesse du projectile
$\overline{F_g}$ = force moyenne des gaz
L = longueur du canon

- Énergie cinétique des gaz

$$Ec_g = \frac{1}{2} m_g V_{x_g}^2$$

Ec_g = énergie cinétique des gaz
m_g = masse des gaz
V_{x_g} = vitesse du centre de gravité du gaz

Oui mais… $V_{x_g}^2 = ?$

Balistique intérieure

☞ Le gaz est considéré comme un milieu continu -> un élément infinitésimal (particule) de gaz contient une grande quantité de molécules
*L'état du gaz est déterminé par $V(x,y,z)$, ρ, p

Ec_g = énergie cinétique du gaz
x_g = position du centre de gravité du gaz
x = position du culot du projectile
V_{x_g} = vitesse du CG du gaz au point x_g
ρ = densité du gaz
A = aire du culot du projectile
V = vitesse du projectile
V_{ol} = volume de gaz

Équation de continuité :
(Lagrange)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_g}(\rho V_{x_g}) = 0$$

☞ <u>Hypothèse</u> : On suppose une densité de gaz uniforme de la culasse au culot du projectile

Soit : $\forall t : \frac{\partial \rho}{\partial x_g} = 0$

En développant le second membre :

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_g}(\rho V_{x_g})} = \boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + V_{x_g}\frac{\partial \rho}{\partial x_g} + \rho\frac{\partial V_{x_g}}{\partial x_g}} = 0$$

Hypothèse

"d" car ρ ne dépend pas de x_g

$$\Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial V_{x_g}}{\partial x_g} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\partial V_{x_g}}{\partial x_g}}$$

Balistique intérieure

Étape précédente ->

1

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\partial V_{x_g}}{\partial x_g}$$

On souhaite se ramener au projectile dont la position est $x(t)$

$$\rho(t) = \frac{m_g}{V_{vol}(t)}$$
$$V_{ol}(t) = Ax(t)$$

Partant de

$$\rho(t) = \frac{m_g}{Ax(t)}$$

Dérivation

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{m_g}{A}\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{x(t)}\right)$$

Dérivation du membre de droite

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{m_g}{A}\frac{1}{x^2(t)}\frac{dx}{dt}$$

On remplace par $\rho(t)$

$$\rho(t) = \frac{m_g}{Ax(t)}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{m_g}{Ax(t)}\frac{1}{x(t)}\frac{dx}{dt} = -\rho\frac{1}{x(t)}\frac{dx}{dt}$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{x(t)}\frac{dx}{dt}$$

2

$$\frac{1}{x(t)}\frac{dx}{dt} = \frac{\partial V_{x_g}}{\partial x_g}$$

2

$$\frac{1}{x(t)}\frac{dx}{dt} = \frac{\partial V_{x_g}}{\partial x_g}$$

$$\partial x_g \frac{1}{x(t)}\frac{dx}{dt} = \partial V_{x_g}$$

Intégration par rapport à x_g

$$\int_{x_g} \partial x_g \frac{1}{x(t)}\frac{dx}{dt} = \int_{x_g} \partial V_{x_g}$$

$$\frac{x_g}{x(t)}\frac{dx}{dt} = V_{x_g}$$

mais $\frac{dx}{dt} = V_p$ =Vitesse du projectile

3

$$\frac{V_p}{x} = \frac{V_{x_g}}{x_g}$$

But fixé

Proportionnalité -> linéarité de la vitesse (hypothèse… osée)

Jean-Jacques DÖRRZAPF

3

Étape précédente $\boxed{\frac{V_p}{x} = \frac{V_{x_g}}{x_g}} \rightarrow \boxed{\frac{V_p}{x} x_g = V_{x_g}}$ et énergie cinétique des gaz -> $\boxed{Ec_g = \frac{1}{2} m_g V_{x_g}^2}$

☞ Pour chaque accroissement dx de la position du projectile, nous avons un accroissement de Ec_g proportionnel à l'accroissement de x_g

En tenant compte que $m_g = \rho A x$ et que est ρ constant $//x$ (hypothèse initiale) , on obtient :

$$\boxed{Ec_g = \int_0^x \frac{1}{2} \rho A V_{x_g}^2 dx_g} \rightarrow \boxed{\frac{1}{2} \rho A \frac{V_p^2}{x^2} \frac{x_g^3}{3} \Big|_0^x} \rightarrow \boxed{Ec_g = \frac{1}{6} m_g V_p^2}$$

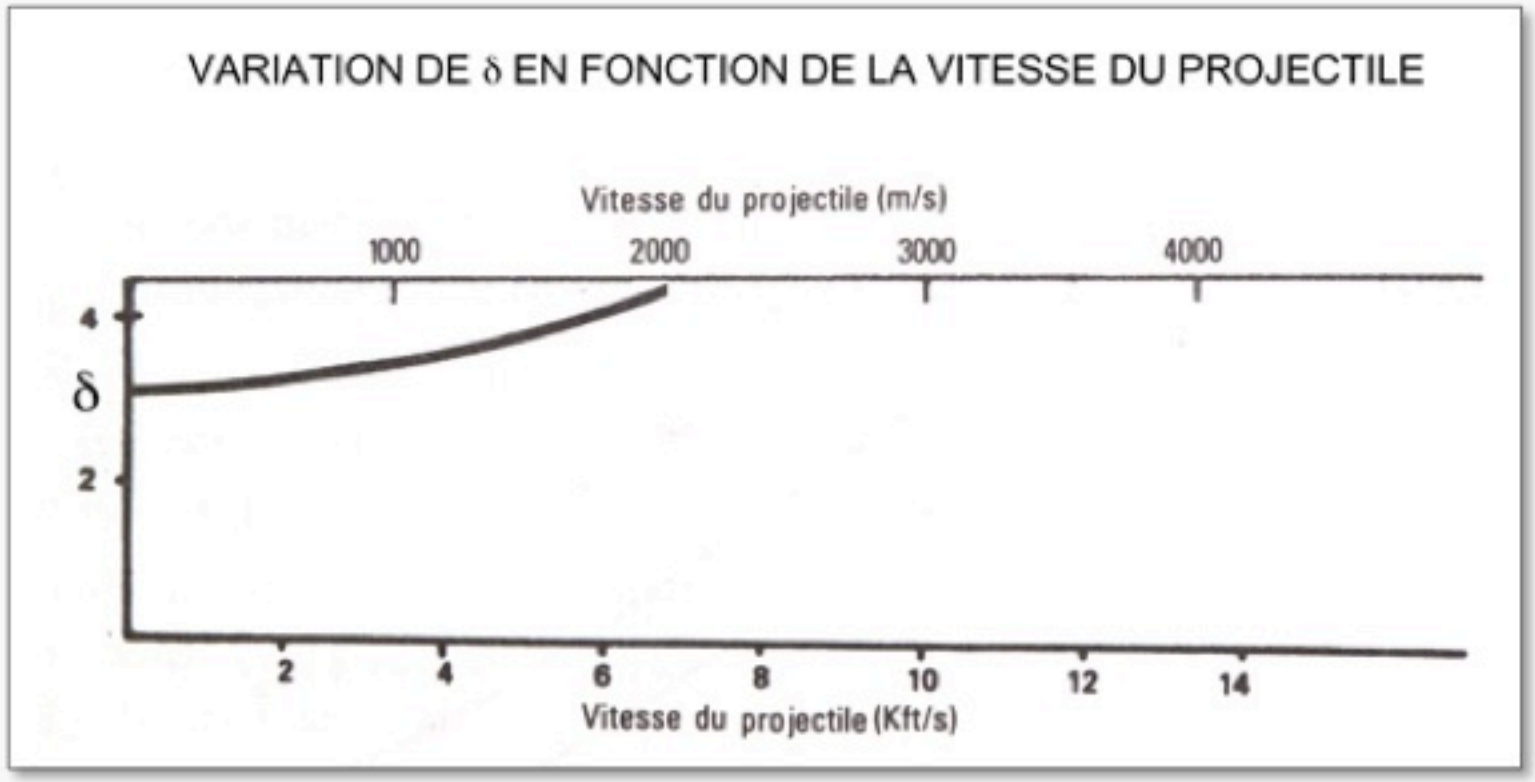
On introduit un coefficient δ * tel que : $Ec_g = \frac{1}{2}(m_g \frac{V_p^2}{\delta})$ avec, ici, $\delta = 3$

*Voir la suite

Énergie cinétique totale : $\boxed{Ec_{Totale} = \frac{1}{2}(m_p + \frac{m_g}{\delta})V^2}$

Vérification par rapport à l'expérience…

Balistique intérieure



- $\delta \approx 3$ pour les faibles vitesses du projectile ($V_p < 600$ m/s)
- Bonne approximation jusqu'à 1000 m/s
- Au delà de 1000 m/s :
  - -la densité du gaz n'est plus uniforme (ondes de pression), notamment à cause de la présence d'une chambre
  - -l'énergie nécessaire pour accélérer les gaz devient importante

➢ Exemple – Application numérique

1 - Projectile de 7,62 mm, m=10,9 g ; masse de poudre 3 g ; vitesse initiale : 850 m/s

Unités SI ->

$$Ec_P = \frac{1}{2} \times 0{,}0109 \times 850^2 \approx 3940 \text{ joules}$$

$$Ec_G = \frac{1}{6} \times 0{,}003 \times 850^2 \approx 360 \text{ joules}$$

2 - Projectile de 9 mm Parabellum, m=8 g ; masse de poudre 0,6 g ; vitesse initiale : 380 m/s

$$Ec_P = \frac{1}{2} \times 0{,}008 \times 380^2 \approx 578 \text{ joules}$$

$$Ec_G = \frac{1}{6} \times 0{,}0006 \times 380^2 \approx 14{,}5 \text{ joules}$$

➢ Quantité de mouvement du projectile et des gaz

☞ Responsable du recul des armes (principe de la conservation de la quantité de mouvement)

$$Q_{système_{initial}} = Q_{système_{final}} = 0 \rightarrow Q_{arme} = -(Q_{projectile} + Q_{gaz})$$

☞ Utilisé dans la cinématique de certaines armes automatiques

(Par exemple : action directe de la veine gazeuse)

☞ En balistique lésionnelle, détermine le choc engendré par un impact

(Par exemple : ALRcinétique ; cône dynamique d'enfoncement en arrière des protections balistiques)

- Quantité de mouvement du projectile

$$Q_p = m_p V_p$$

- Quantité de mouvement des gaz

$$Q_g = m_g V_{x_g}$$

En introduisant ρ on obtient :

$$Q_p = \int_0^x \rho A V_{x_g} dx_g = \rho A \int_0^x \frac{x_g}{x} V_p dx_g \rightarrow \frac{1}{2}\rho A \frac{V_p}{x} x_g^2 \Big|_0^x \rightarrow \frac{1}{2}\rho A x V_p \rightarrow Q_p = \frac{1}{2} m_g V_p$$

- Quantité de mouvement totale

$$Q_{Totale} = m_p V_p + \frac{1}{2} m_g V_p = (m_p + \frac{m_g}{2}) V_p$$

* Pour les canons chambrés la vitesse des gaz peut être légèrement inférieure à celle prévue

- Bilan énergétique classiquement retenu

Mouvement du projectile* Mouvement des gaz propulsifs Pertes par frottements (projectile et gaz) Chaleur absorbée par l'arme et le projectile Chaleur conservée par les gaz	32 % 3 % 3 % 20 % 42 %
Energie totale produite par la poudre	100 %

* Énergie de rotation de l'ordre de 1% de l'énergie du projectile -> pas d'effet lésionnel

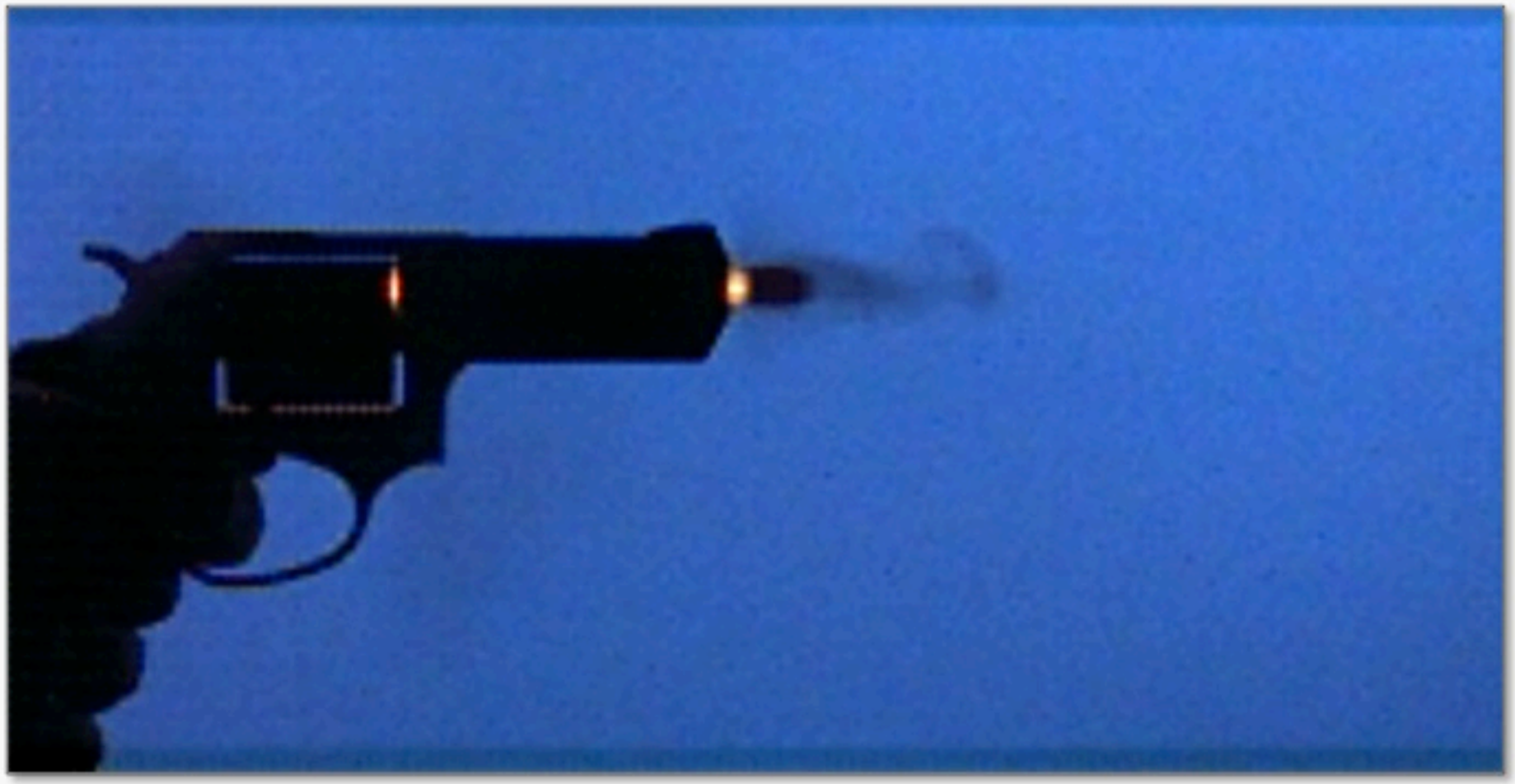
EUROBALLISTICS

3ème CONGRÈS
de
BALISTIQUE LÉSIONNELLE

LA BALISTIQUE INTERMÉDIAIRE

Jean-Jacques DÖRRZAPF

- Le projectile quitte le canon



Revolver Ruger SP 101 calibre 38 Spécial

Vidéo rapide

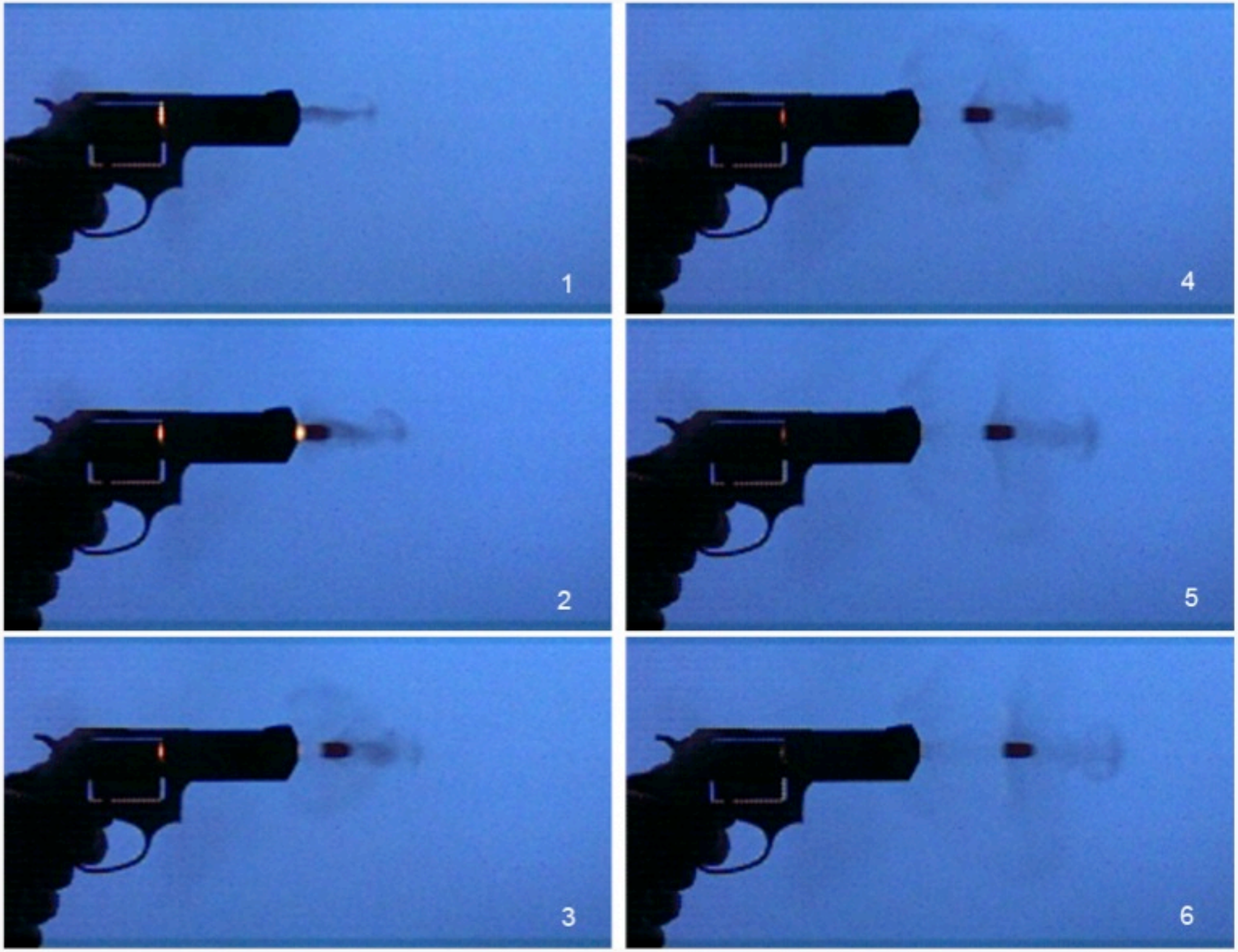
Revolver Ruger SP 101 calibre 38 Spécial – Vidéo rapide 40 000 images/s

Vidéo rapide

Revolver Ruger SP 101 calibre 38 Spécial – Vidéo rapide 40 000 images/s

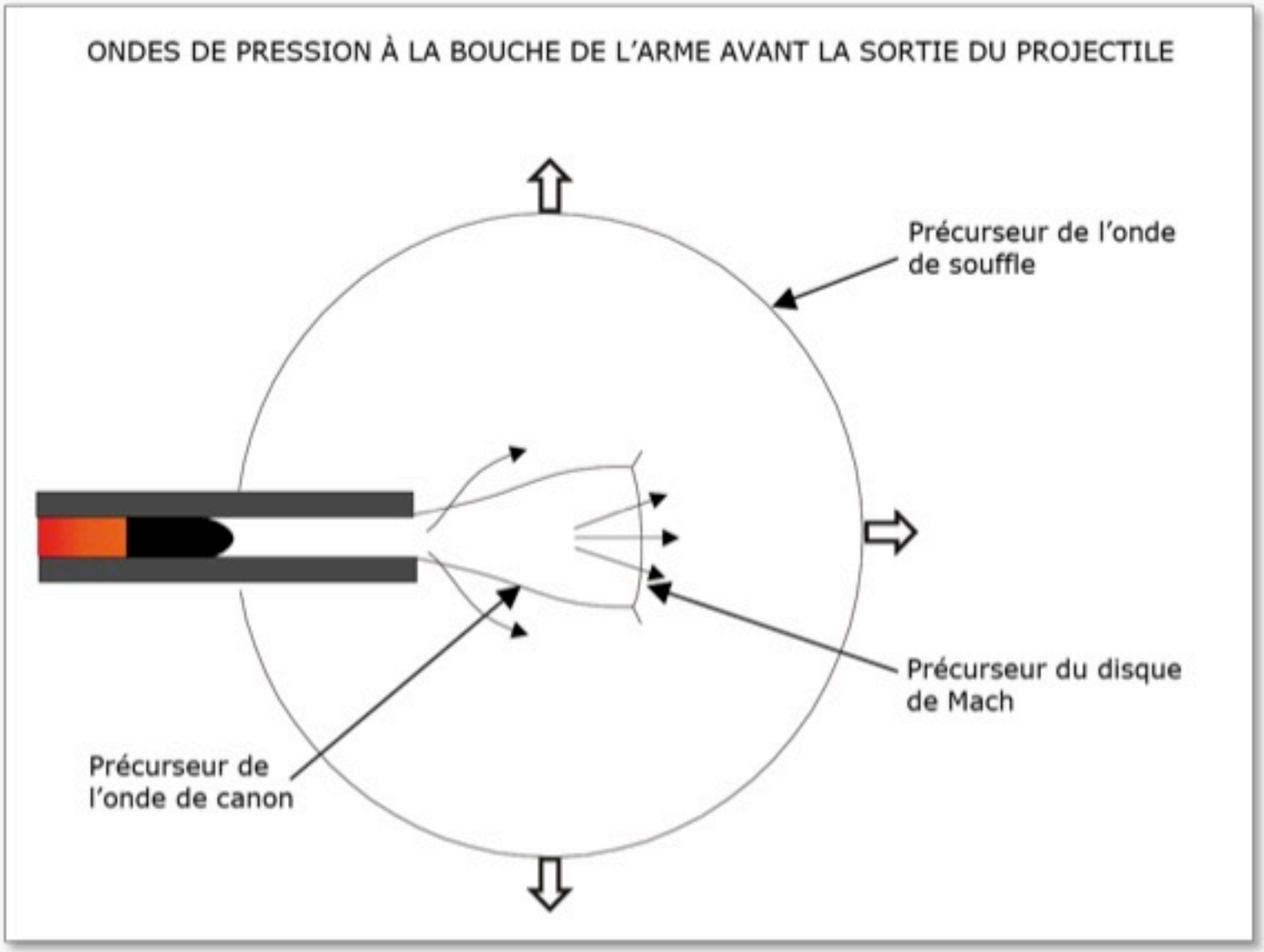
Retour

Balistique intermédiaire

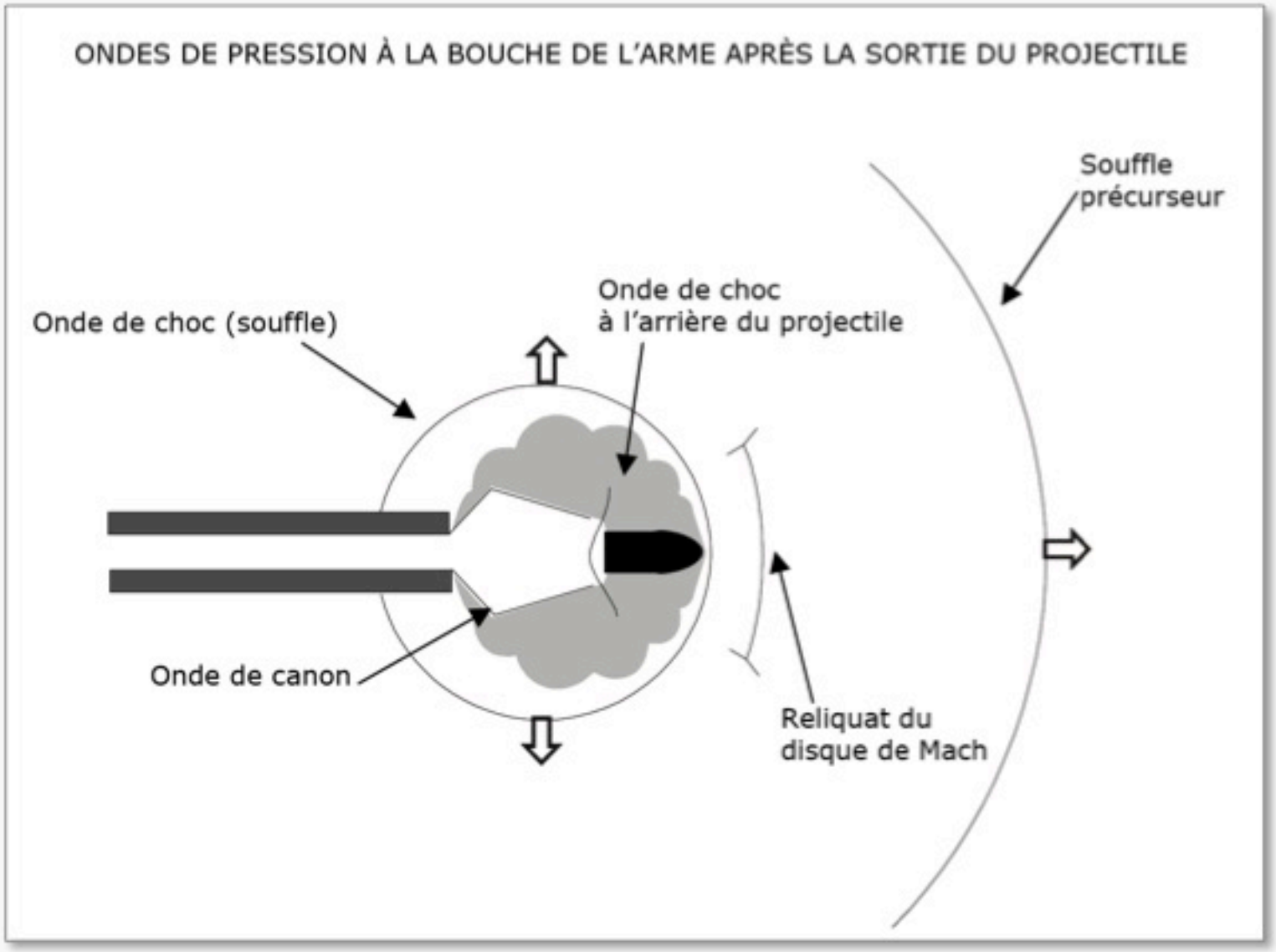


Revolver Ruger SP 101 – Comportement des gaz à la bouche t = 1/40 000

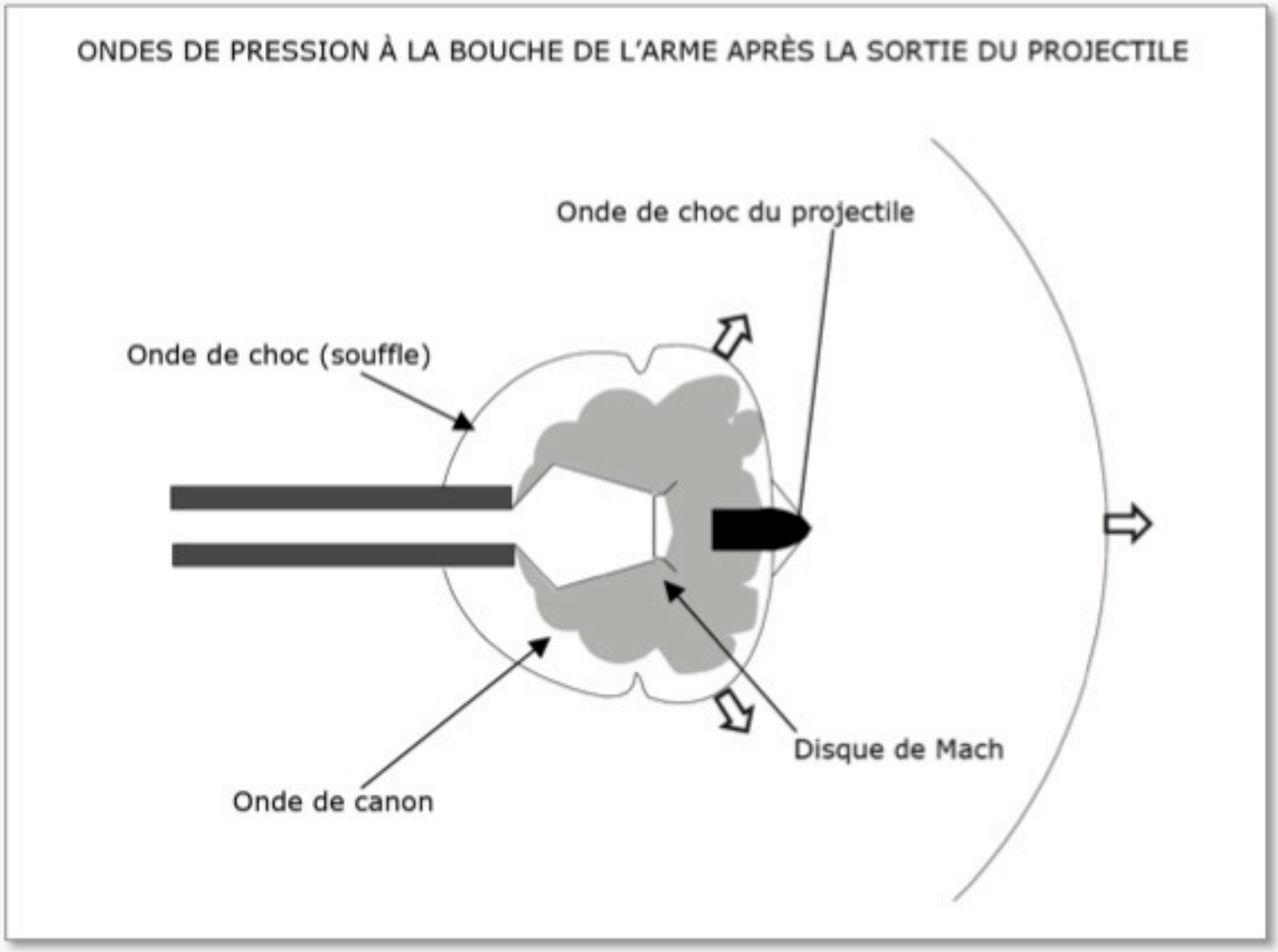
- Présentation schématique des phénomènes à la bouche de l'arme



- Présentation schématique des phénomènes à la bouche de l'arme



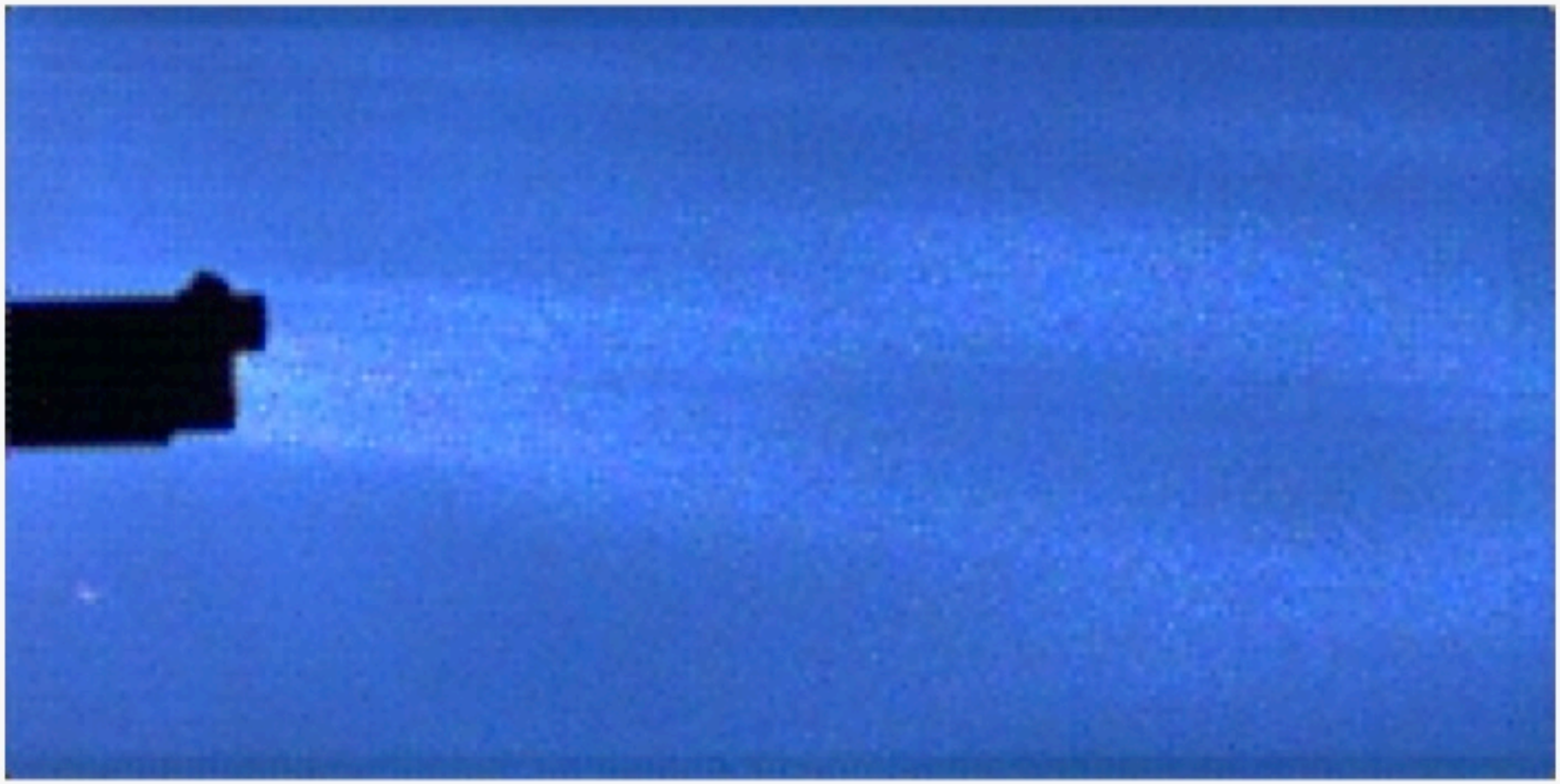
- Présentation schématique des phénomènes à la bouche de l'arme



Vidéo rapide

Pistolet automatique Beretta 92 F calibre 9 mm Parabellum

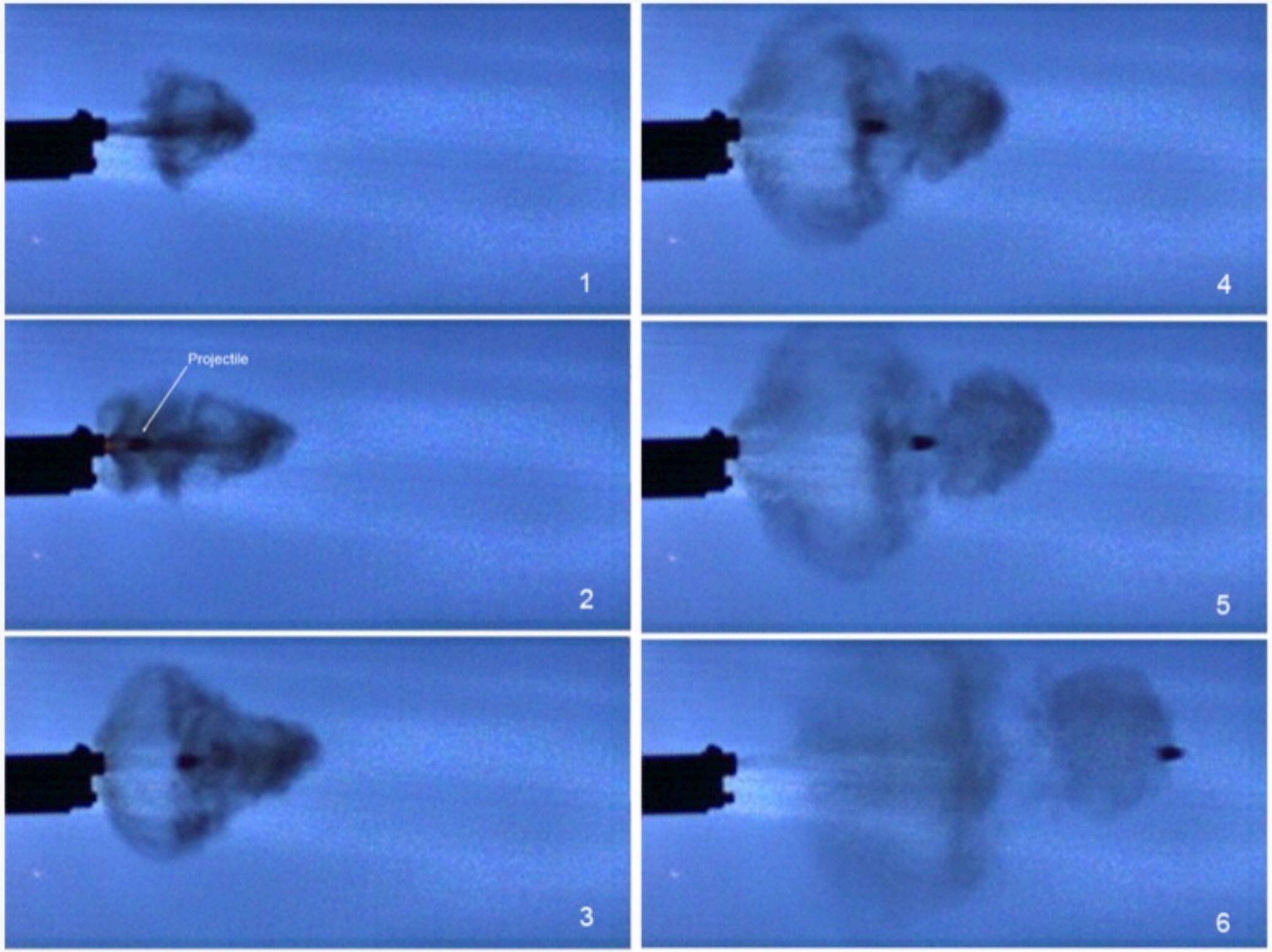
Vidéo rapide



Pistolet automatique Beretta 92 F calibre 9 mm Parabellum

Retour

Balistique intermédiaire

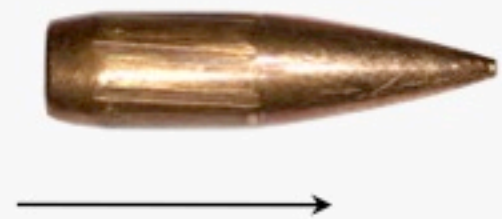


Pistolet automatique Beretta 92 F ; 9 mm Parabellum – Comportement des gaz à la bouche

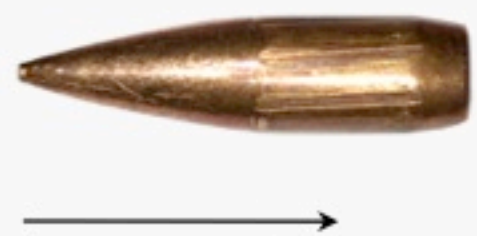
Balistique intermédiaire

➢ Conséquences sur le projectile

Comportement normal d'un projectile prévu pour être stable par rapport au milieu avec lequel il interagit



Comportement "équivalent" du projectile lorsqu'il est soumis à l'action des gaz à proximité de la bouche de l'arme : il "attaque" le flux gazeux à l'envers



Vidéo rapide

Calibre 12 – Munition flèche à sabot Sauvestre – Phénomènes à la bouche

Vidéo rapide

Calibre 12 – Munition flèche à sabot Sauvestre – Phénomènes à la bouche

Retour

Vidéo rapide

Calibre 12 – Munition flèche à sabot Sauvestre – Phénomènes à 1 m de la bouche

Vidéo rapide

Calibre 12 – Munition flèche à sabot Sauvestre – Phénomènes à 1 m de la bouche

EUROBALLISTICS

3ème CONGRÈS
de
BALISTIQUE LÉSIONNELLE

LA BALISTIQUE EXTÉRIEURE

Jean-Jacques DÖRRZAPF

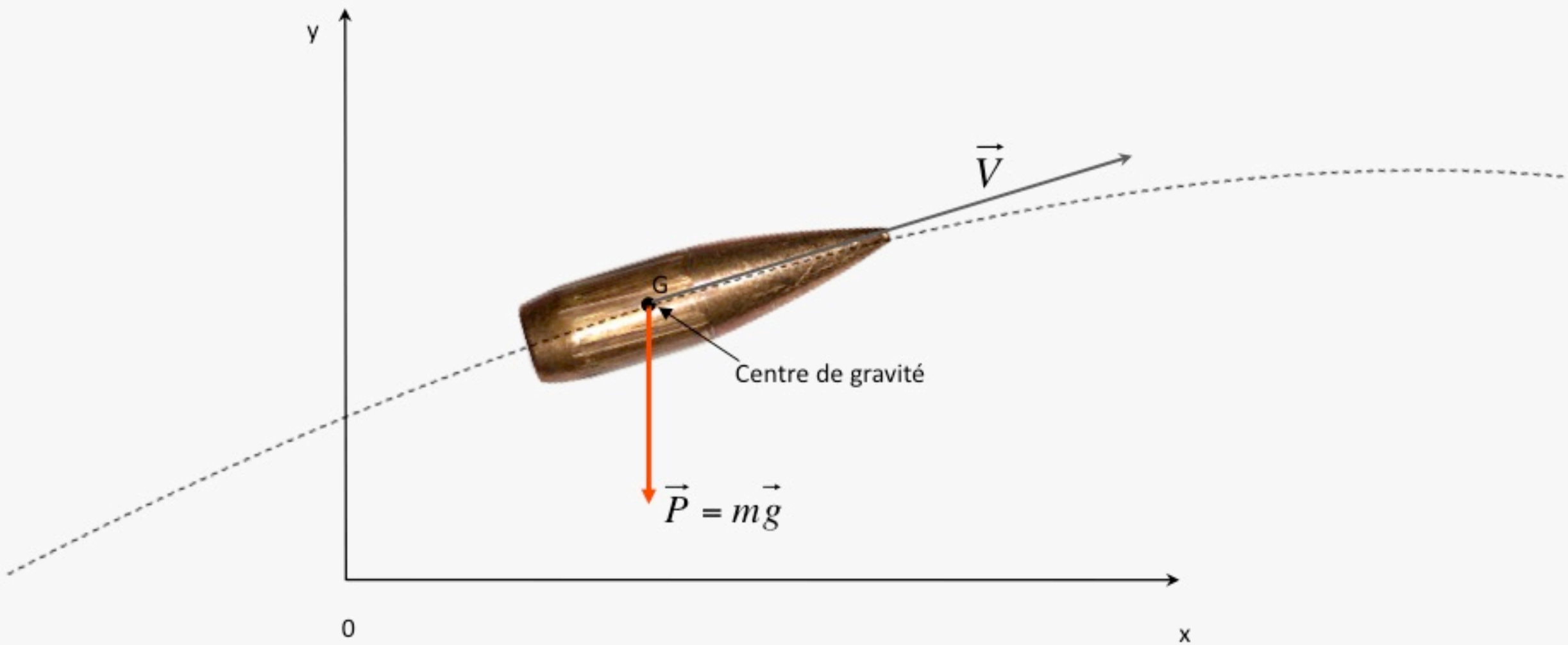
LA BALISTIQUE DANS LE VIDE

Jean-Jacques DÖRRZAPF

➢ Trajectoire dans le vide

☞Le projectile n'est soumis qu'à une seule force : son poids $\vec{P} = m\vec{g}$

☞Il est animé d'une vitesse $\vec{V}$ dont le vecteur représentatif est tangent à sa trajectoire qui détermine un plan -> plan de tir

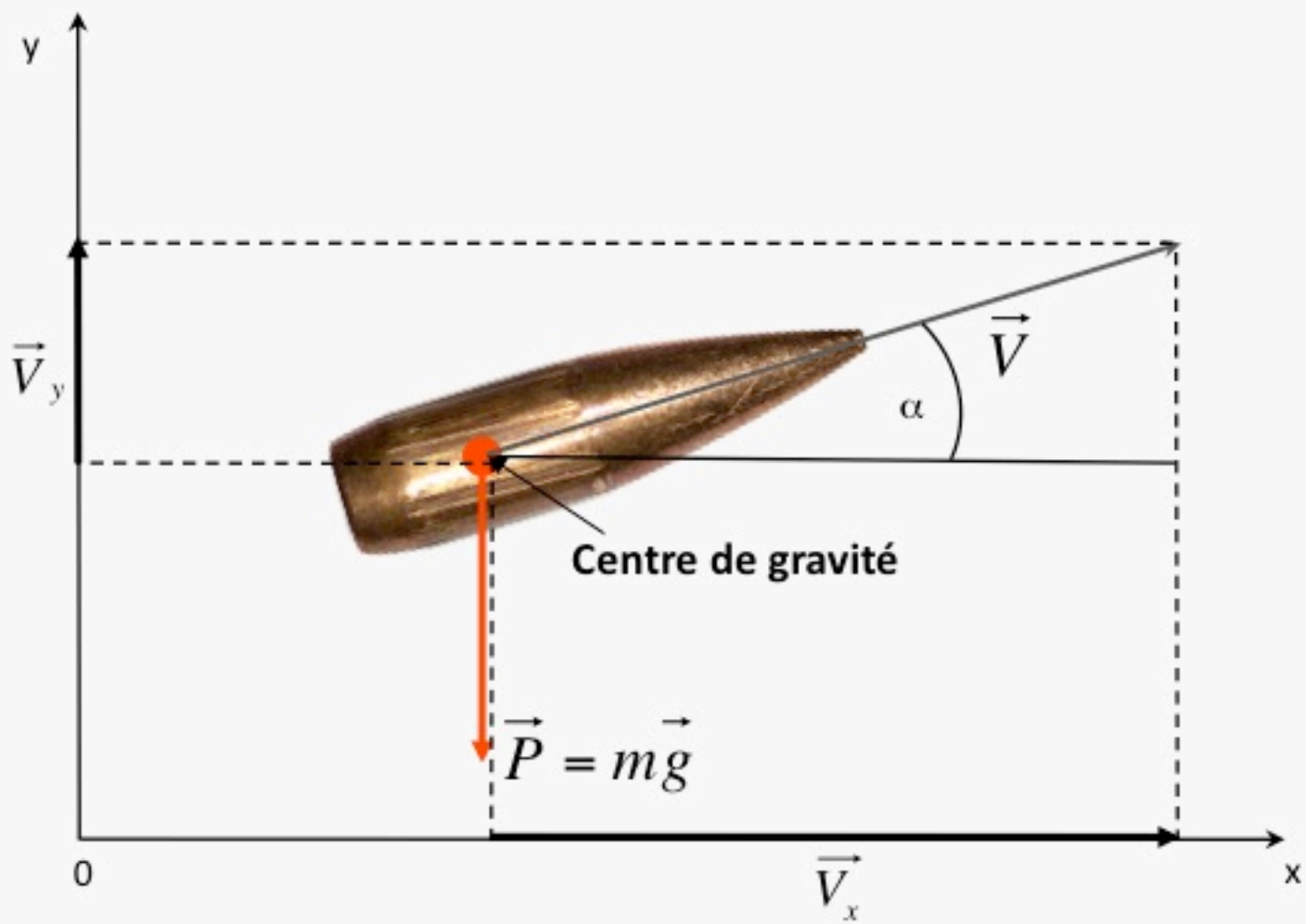


Balistique extérieure

- Étude du mouvement du projectile

  - Décomposition du vecteur vitesse selon ses deux composantes :

    – Horizontale : $\vec{V}_x = V\cos\alpha$
    et
    – Verticale : $\vec{V}_y = V\sin\alpha$



Mouvement uniformément accéléré

Intégration ↑ / Dérivation ↓

$$x = \frac{1}{2}\vec{a}_x t^2 + \vec{V}_{0_x} t + x_0$$

$$\vec{V}_x = \frac{dx}{dt} = \vec{a}_x t + \vec{V}_{0_x}$$

$$\vec{a}_x = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Intégration ↑ / Dérivation ↓

$$y = \frac{1}{2}\vec{a}_y t^2 + \vec{V}_{0_y} t + y_0$$

$$\vec{V}_y = \frac{dy}{dt} = \vec{a}_y t + \vec{V}_{0_y}$$

$$\vec{a}_y = \frac{d^2y}{dt^2}$$

Balistique extérieure

➢ Étude du mouvement du projectile

⇨ NEWTON ⇨ deuxième loi de la dynamique $\vec{F} = m\vec{a} = \frac{dx}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$

Forme générale

- Forces appliquées au projectile :

  – Selon l'axe x : $\vec{F}_x = m_p \frac{d^2x}{dt^2} = 0$ (pas d'accélération selon x)

  –Selon l'axe y : $\vec{F}_y = m_p \frac{d^2y}{dt^2} = -m_p \vec{g}$

m_p = masse du projectile

$\vec{g}$ = accélération de la pesanteur = 9,81 m/s^{-2}

- Loi du mouvement du projectile selon les axes x et y

  – Selon x : $x = V_0 t \cos\alpha$

  – Selon y : $y = -\frac{1}{2} g t^2 + V_0 t \sin\alpha$

☞ La masse du projectile n'intervient pas !

- Expression de y en fonction de x :

$$x = V_0 t \cos\alpha \Rightarrow t = \frac{x}{V_0 \cos\alpha} \rightarrow y = -\frac{1}{2} g \left(\frac{x}{V_0 \cos\alpha}\right)^2 + V_0 \left(\frac{x}{V_0 \cos\alpha}\right) \sin\alpha$$

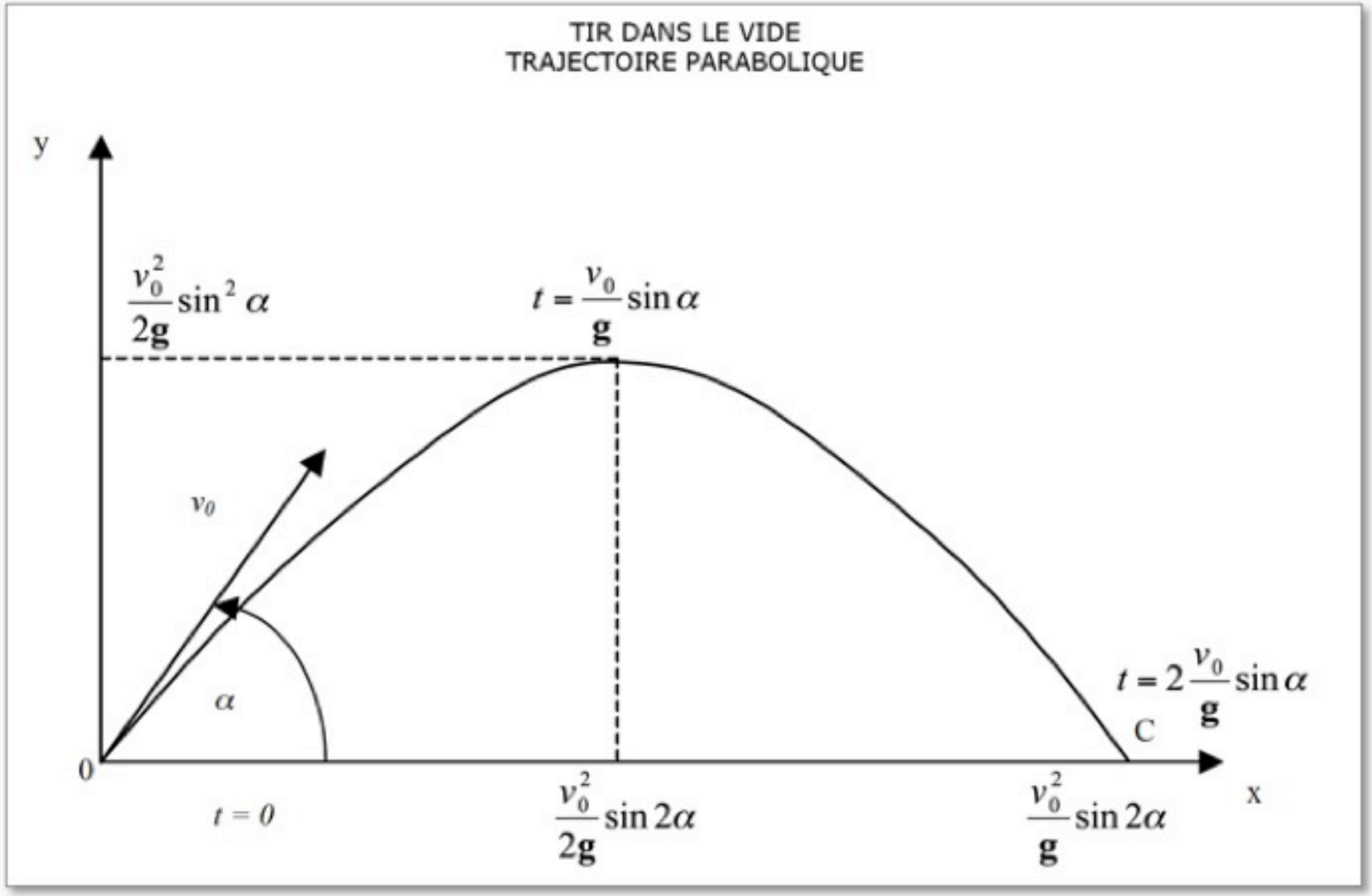
Soit :

$$y = -\frac{g}{2V_0^2 \cos^2\alpha} x^2 + x tg\alpha$$

Équation d'une parabole

Balistique extérieure

- Parabole de tir et ses point particuliers exprimés en fonction de “t“ et de “x“



☞ Vitesse finale = vitesse initiale

Balistique extérieure

- Intérêt de l'étude du tir dans le vide
  - ✓ Commencer par le moins compliqué
  - ✓ Bonne approche pour les projectiles lents (V < 50 m/s) et/ou denses
  - ✓ Détermination de portées et de distances de tir limites

LA BALISTIQUE DANS L'AIR

Jean-Jacques DÖRRZAPF

Balistique extérieure

Nombre de Mach : $M = \frac{V_{projectile}}{V_{son}}, V_{son} = a$

Nombre de Reynolds : $R = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$

U – vitesse du fluide (m/s)

L – longueur caractéristique (m)

ν – viscosité cinématique : $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ (m^2/s)

ρ – masse vomumique (kg/m^2)

μ – viscosité dynamique (Pa.s)

➢ Propagation des projectiles dans l'air

L'interaction projectile-air est à l'origine de trois forces :

→ • Pression à l'avant du projectile (traînée d'ogive)

Dépend du nombre de Mach = V_{proj}/V_{son} ; (V_{son}= a)

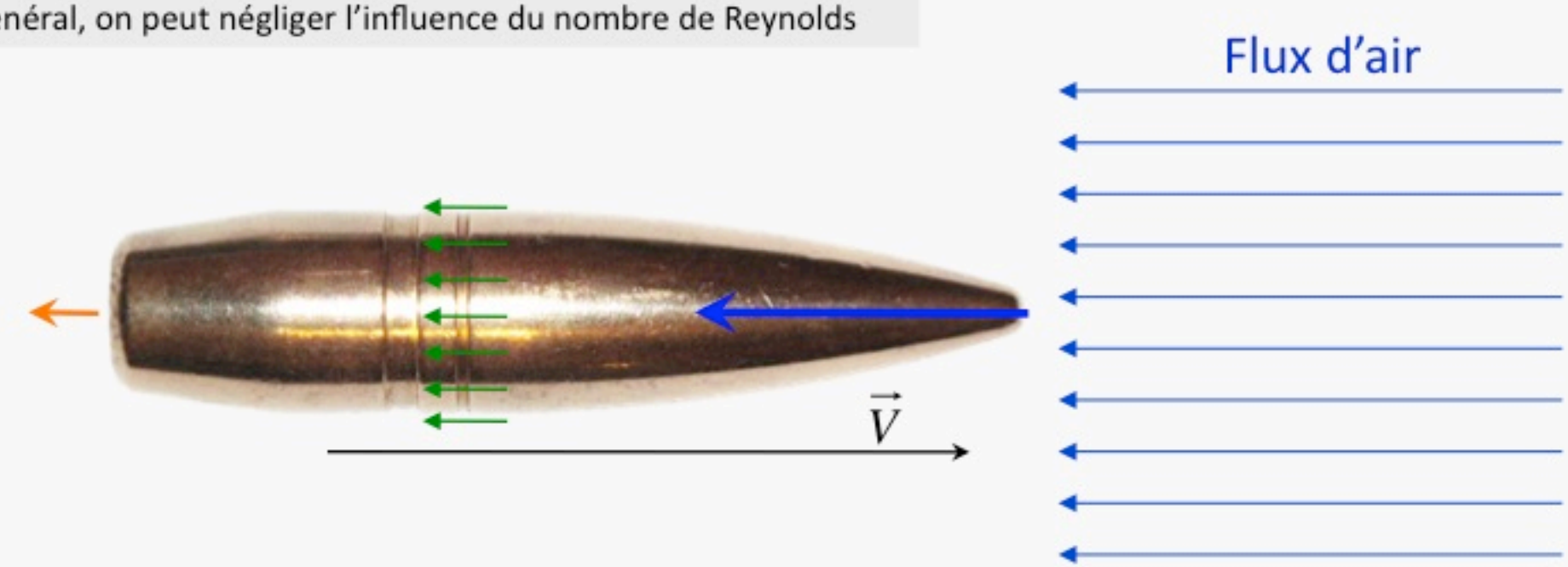
→ • Dépression à l'arrière du projectile (trainée de culot)

Dépend principalement du nombre de Mach mais aussi du nombre de Reynolds

→ • Frottement de surface dû à la viscosité de l'air

Dépend à la fois du nombre de Mach et du nombre de Reynolds

* En général, on peut négliger l'influence du nombre de Reynolds



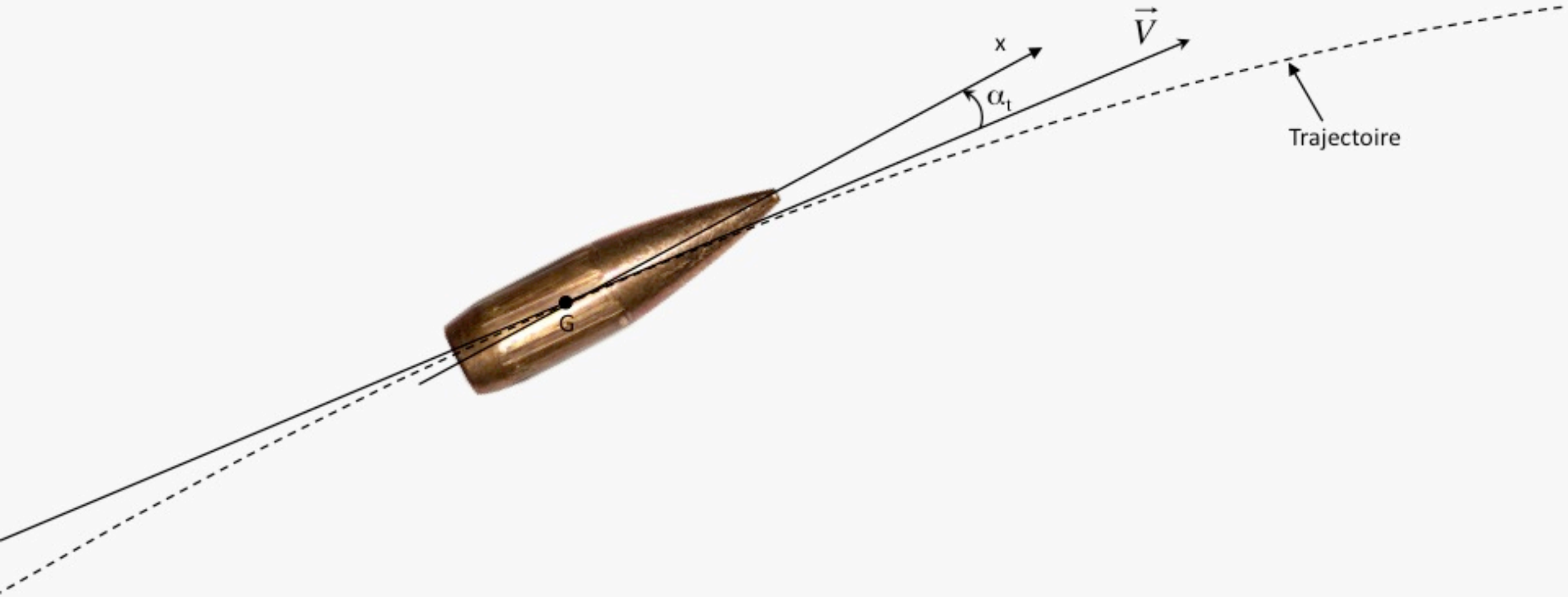
LES FORCES APPLIQUÉES AU PROJECTILE

Jean-Jacques DÖRRZAPF

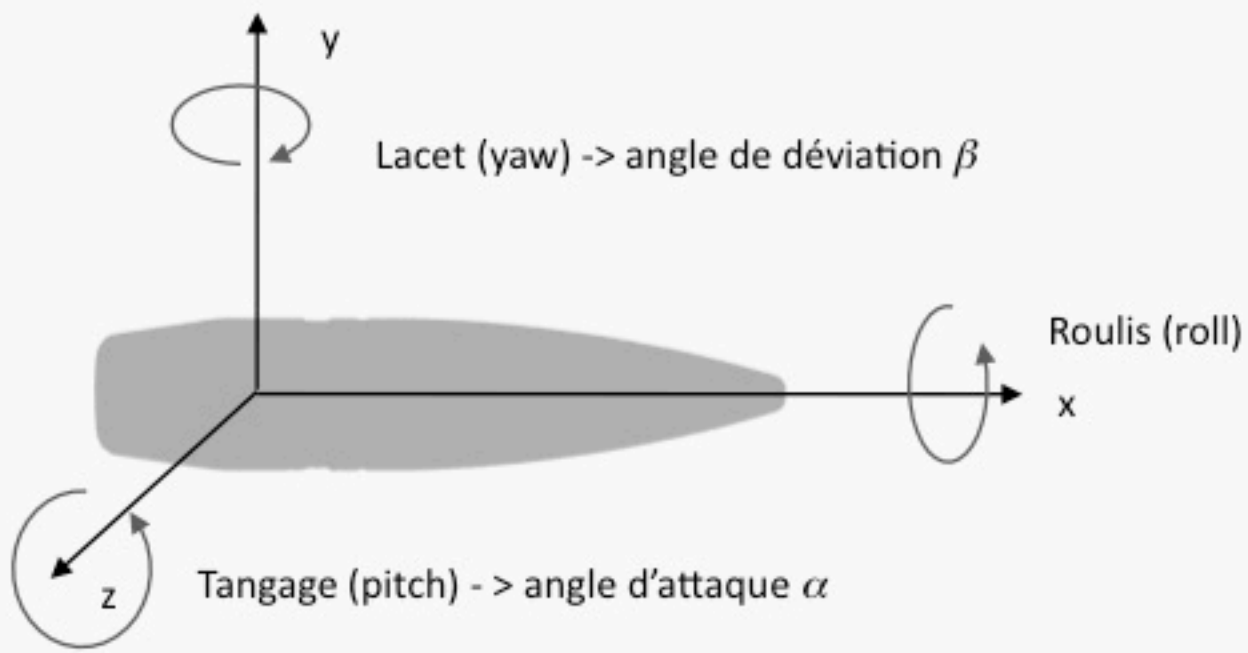
Balistique extérieure

- Mouvement du projectile sur sa trajectoire

☞ En pratique le projectile n'est jamais parfaitement aligné sur le vecteur vitesse -> obliquité



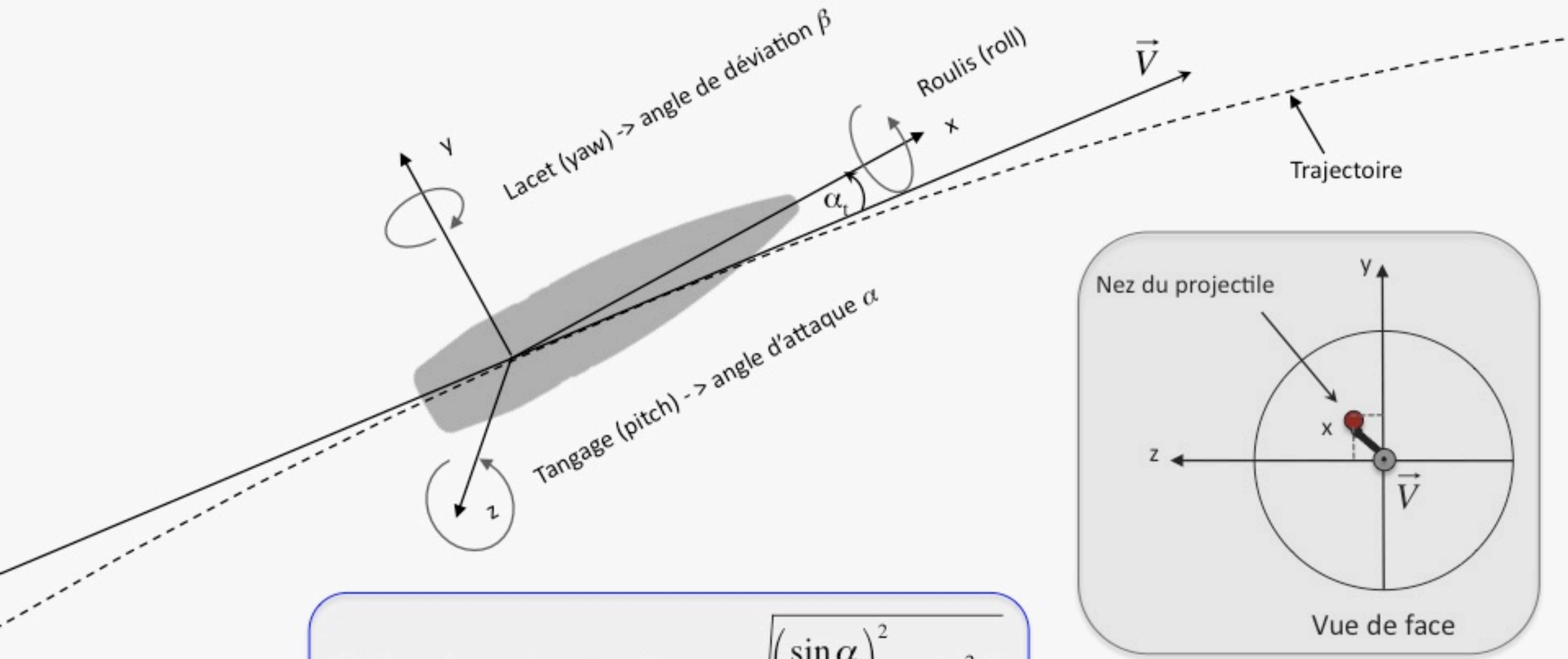
- Obliquité - Trièdre de référence pour le projectile



☞ Le sens des rotations peuvent être inversés selon les ouvrages
☞ La balistique moderne fusionne le tangage (pitch) et le lacet (yaw) en un seul terme obliquité (yaw)

Balistique extérieure

- Obliquité totale α_t

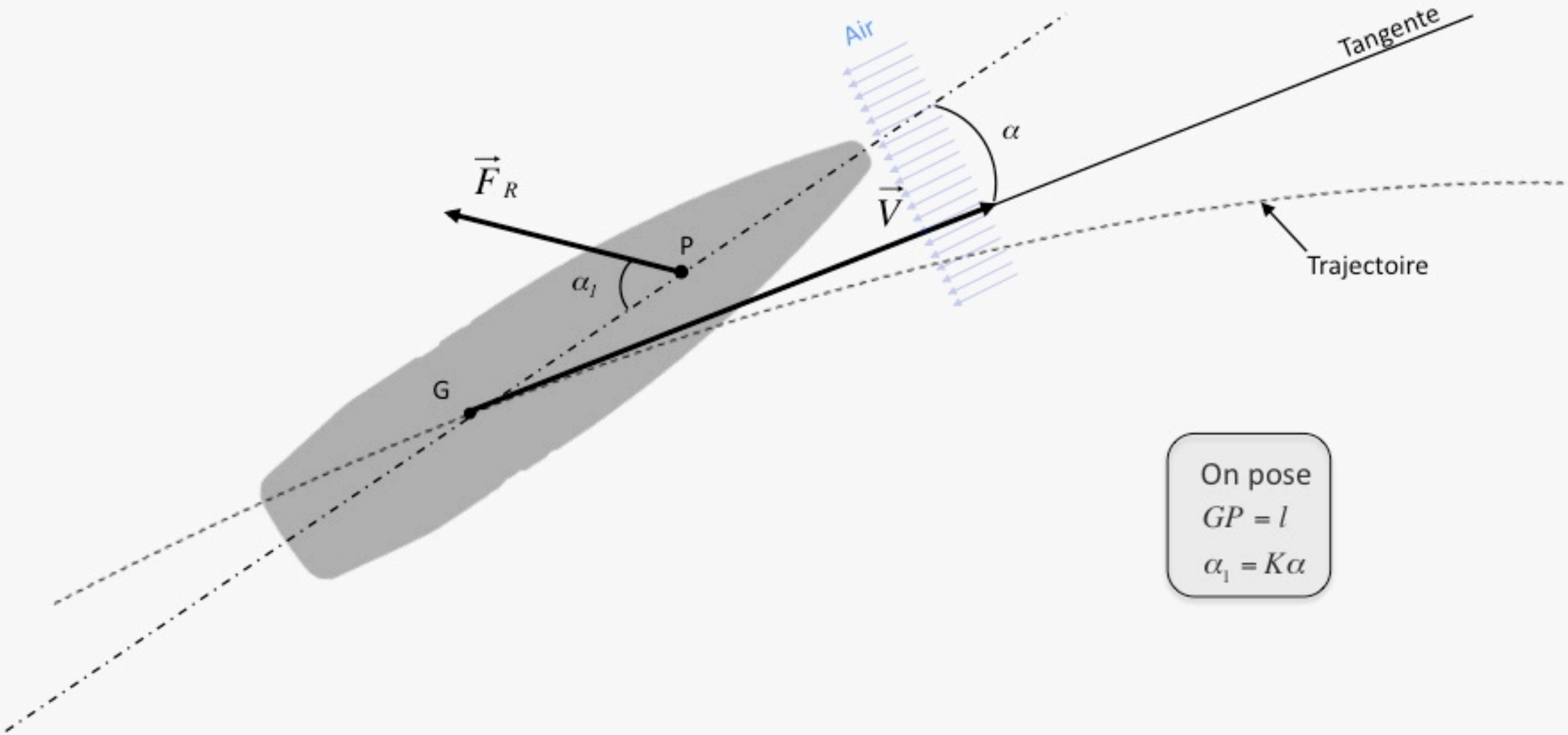


Obliquité totale : $\delta = \sin\alpha_t = \sqrt{\left(\frac{\sin\alpha}{\cos\beta}\right)^2 + \sin^2\beta}$

Pour α et β petits (< 15 °) : $\alpha_t = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$

Balistique extérieure

- Les forces aérodynamiques

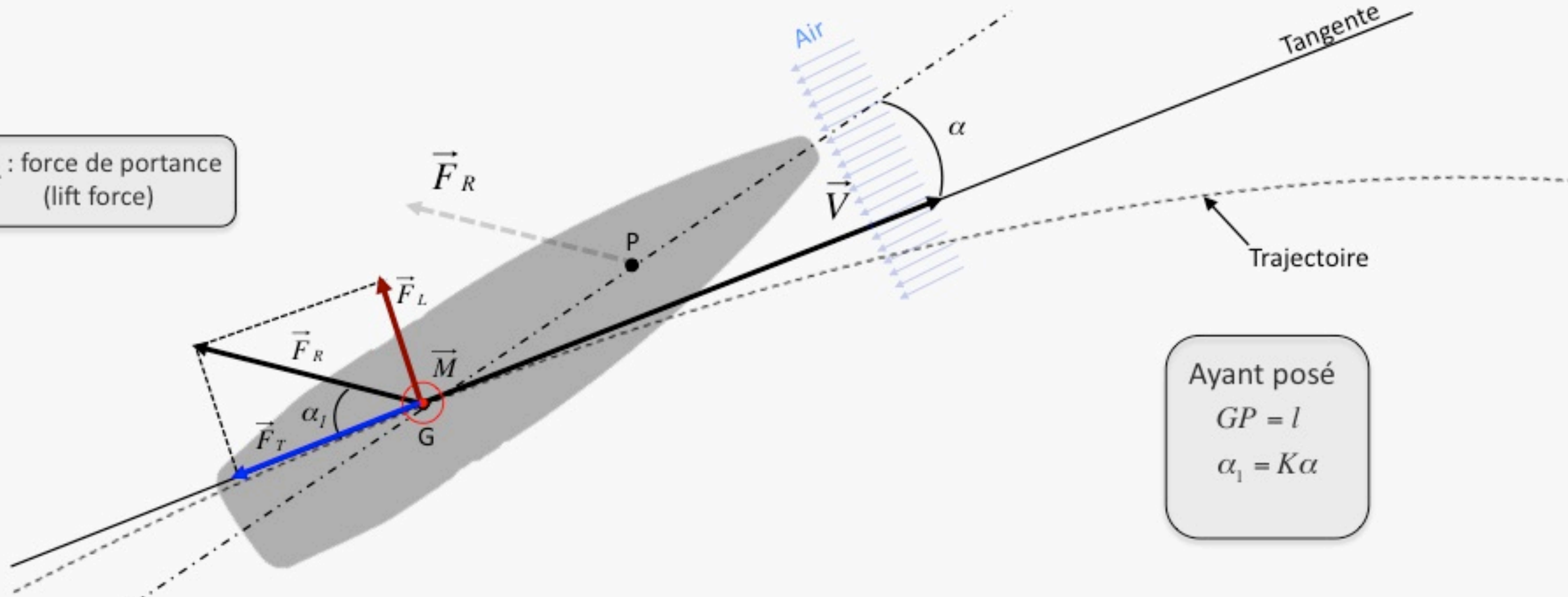


On pose
$GP = l$
$\alpha_1 = K\alpha$

Balistique extérieure

- Les forces aérodynamiques - Décomposition
  - Réduction au centre de gravité

F_L : force de portance (lift force)



Ayant posé
$GP = l$
$\alpha_1 = K\alpha$

- Réduction en G -> force équipollente à $\vec{F}_R$ et un couple $\vec{M} = \overrightarrow{GP} \wedge \vec{F}$ ($\odot$)
- Décomposition de $\vec{F}_R$ en $\vec{F}_T$ et $\vec{F}_L$ suivant et normal au mouvement (tangente)

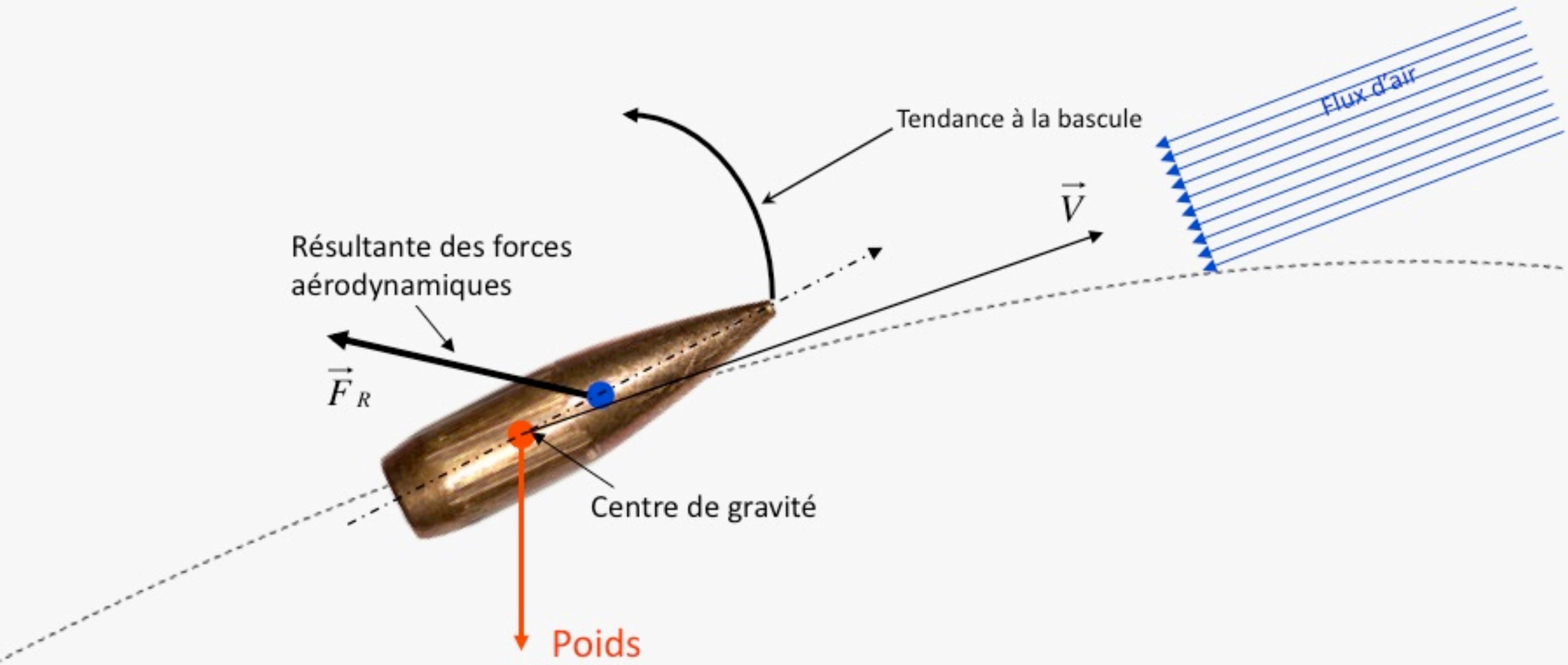
$\vec{F}_T$: traînée et $\vec{F}_L$: portance

LA STABILISATION DES PROJECTILES
(Intermède…)

Jean-Jacques DÖRRZAPF

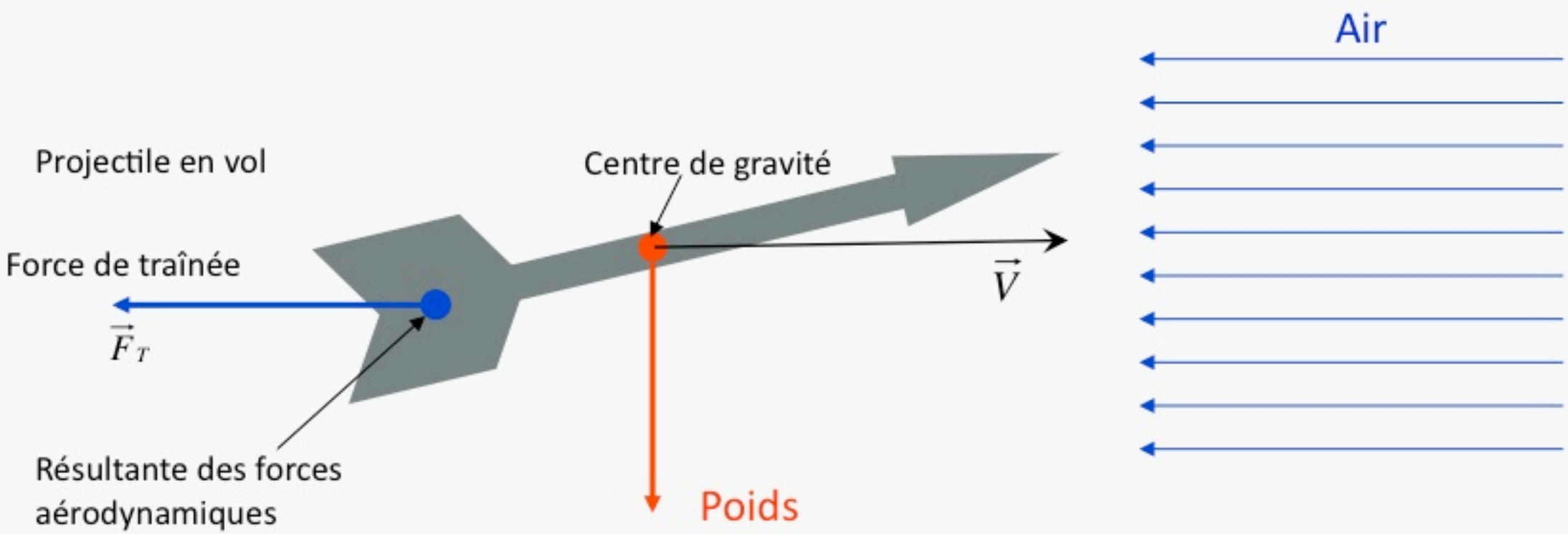
Balistique extérieure

- Stabilisation des projectiles



Balistique extérieure

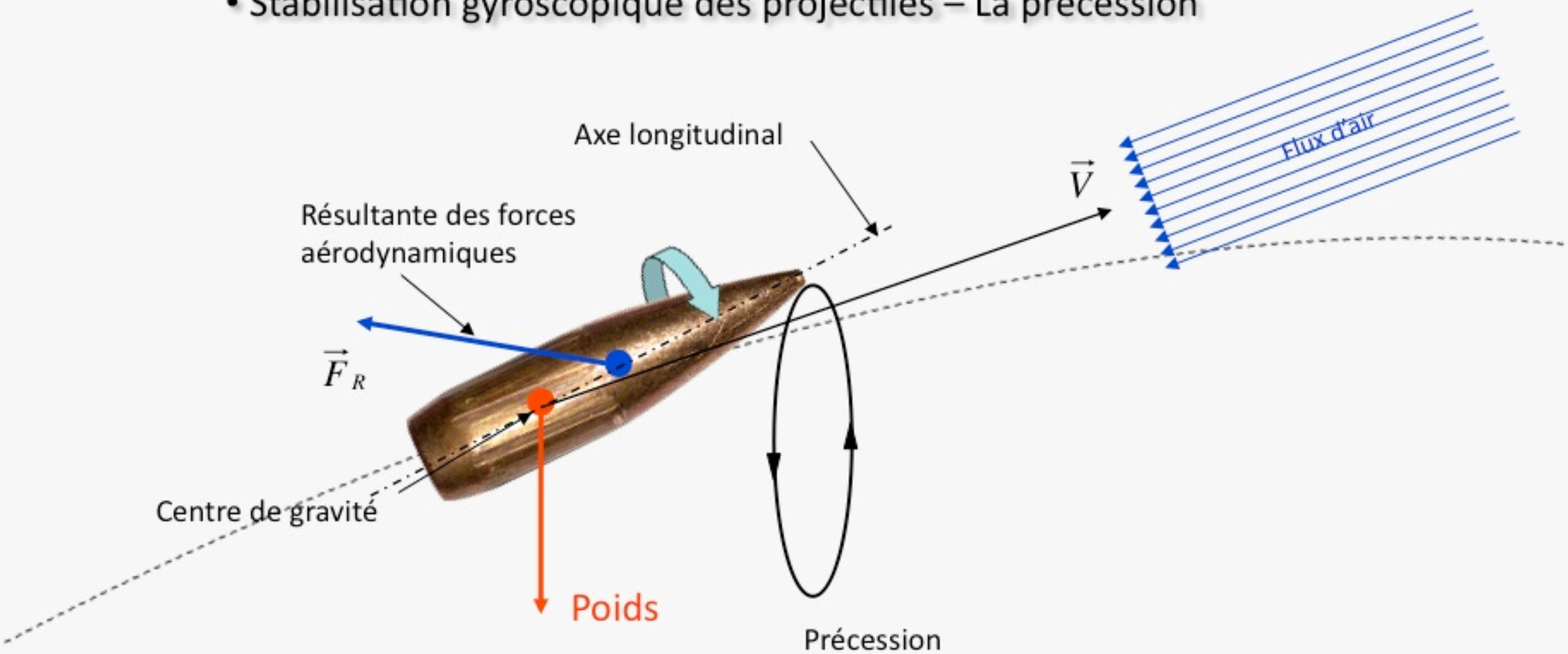
- Stabilisation des projectiles à empennage par empennage



☞ Le poids du projectile ramené au centre de gravité et la force de traînée génèrent un couple ayant tendance à le stabiliser

Balistique extérieure

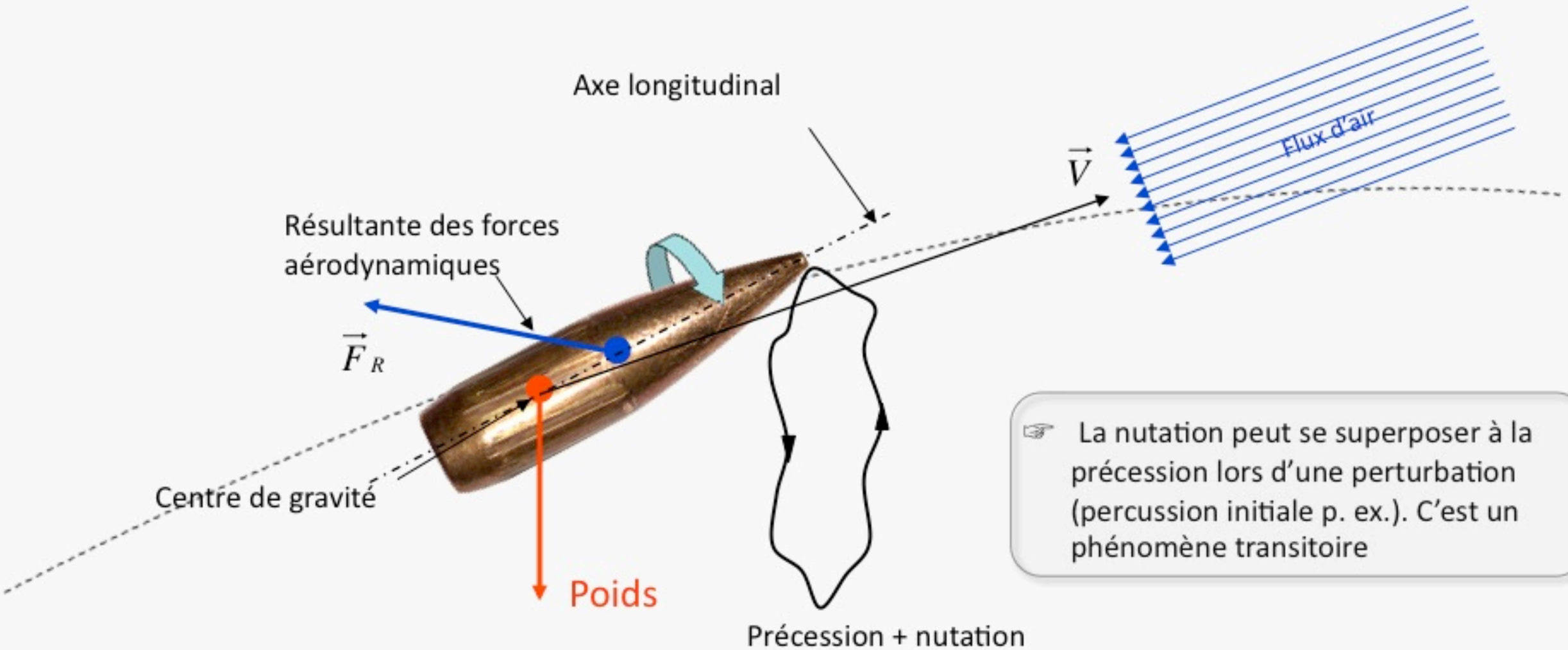
- Stabilisation gyroscopique des projectiles – La précession



☞ On imprime au projectile une vitesse de rotation très élevée (plusieurs milliers de tours par seconde) autour de son axe longitudinal. La pointe du projectile décrit un cercle (la tendance à la bascule se "transforme" en précession). La vitesse de rotation doit être d'autant plus élevée que la densité (entre autres paramètres) du milieu traversé est élevée

Balistique extérieure

- Stabilisation gyroscopique des projectiles – La précession et la nutation



☞ La nutation peut se superposer à la précession lors d'une perturbation (percussion initiale p. ex.). C'est un phénomène transitoire

Voir la stabilisation par effet gyroscopique

LES FORCES APPLIQUÉES AU PROJECTILE
(Fin de l'intermède…)

Jean-Jacques DÖRRZAPF

- Les forces appliquées au projectile

  - La force de trainée ou retardation (drag force)

- Forme vectorielle $$\vec{F}_T = -\frac{1}{2}\rho S C_T \vec{V} V$$

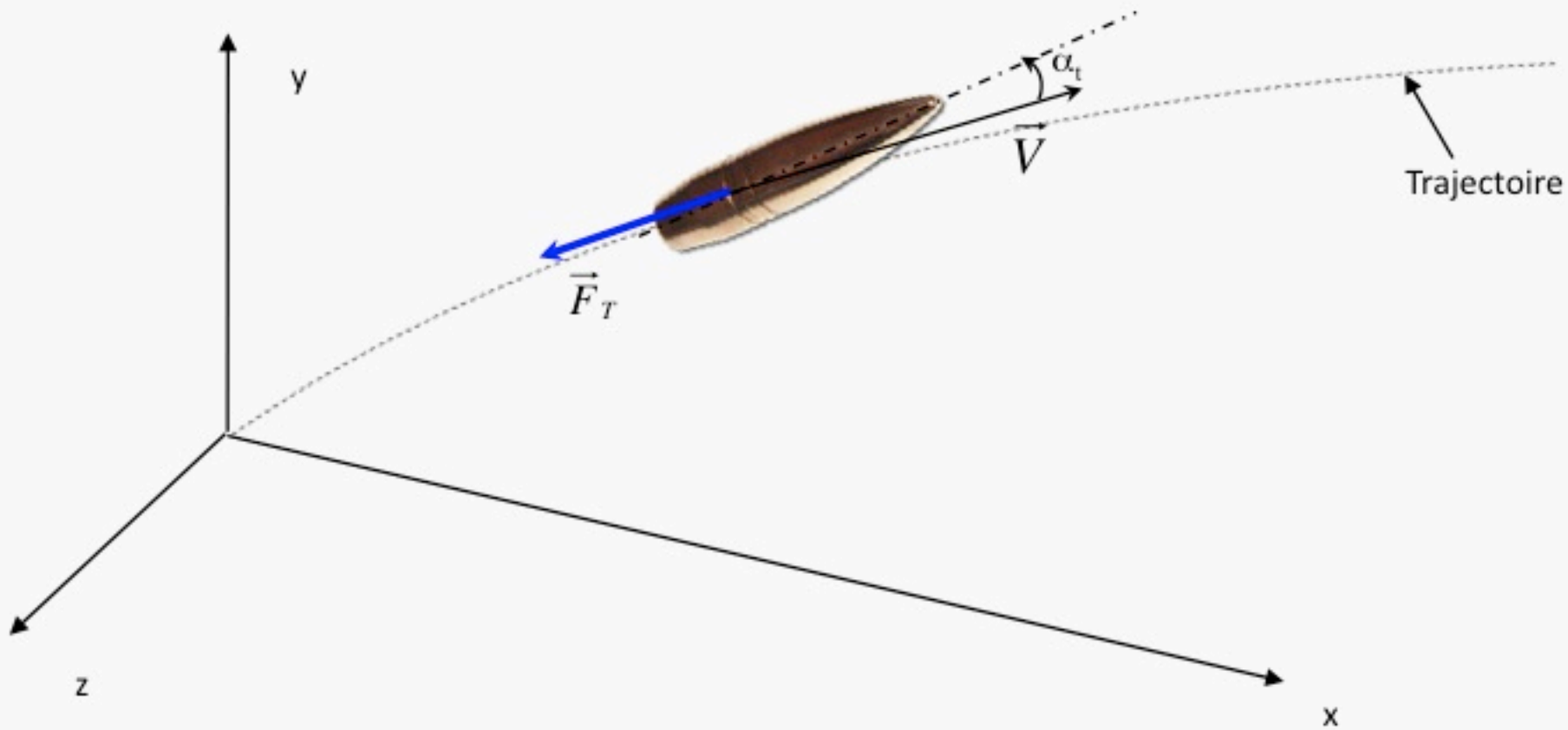
- Module $$F_T = -\frac{1}{2}\rho V^2 S C_T$$

ρ : densité de l'air (kg/m^3)
S : aire caractéristique(m^2)
C_T : coefficient de traînée

$$\frac{1}{2}\rho V^2$$ -> homogène à une pression -> pression dynamique

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$ avec d^2 diamètre de référence du projectile définissant le maître couple

☞ La force de traînée (retardation) est opposée au vecteur vitesse -> elle freine le projectile



Balistique extérieure

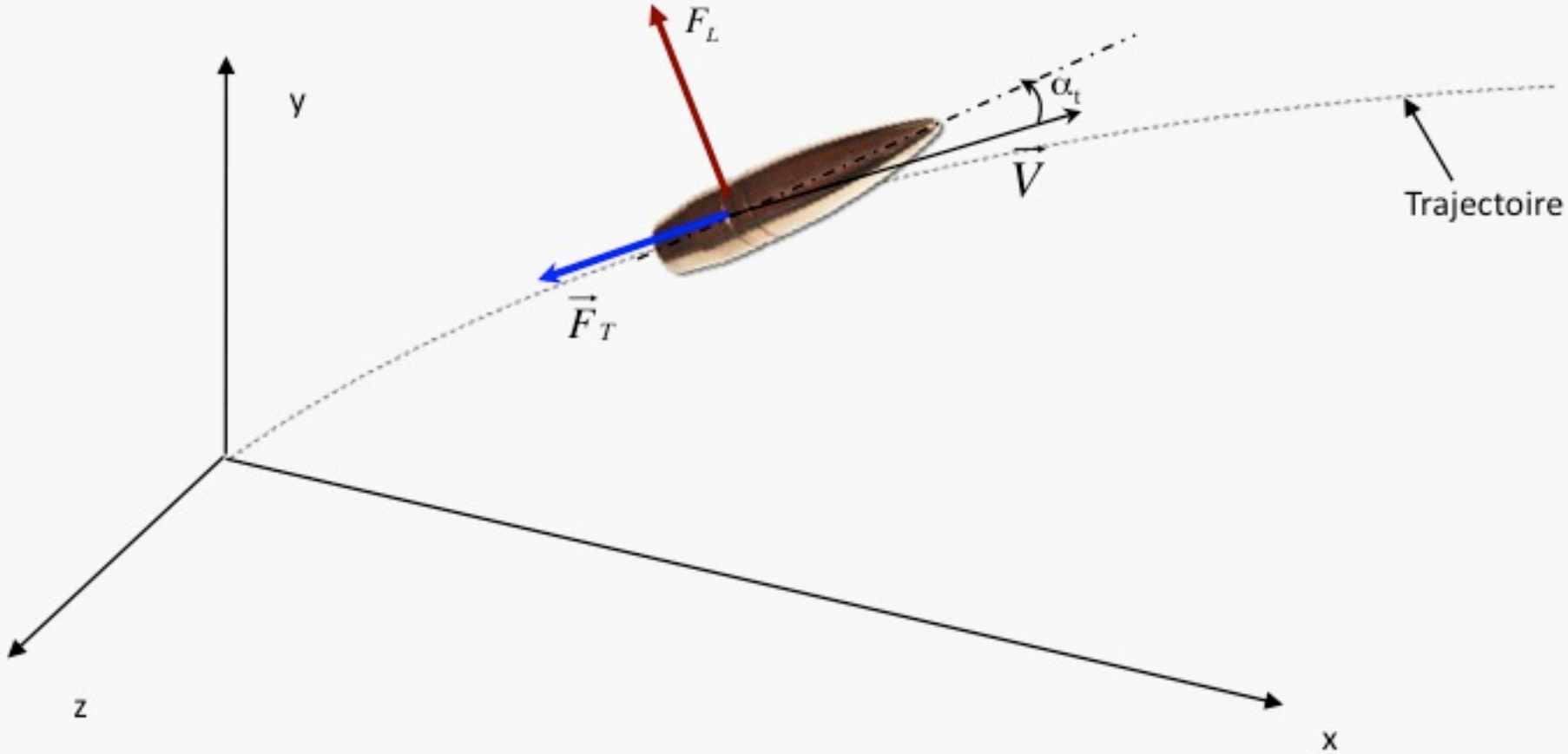
- La force de portance (lift force)

☞ Elle est due à l'obliquité du projectile

$C_{L\alpha}$: coefficient de plané (Lift coef.)
α_t : obliquité totale

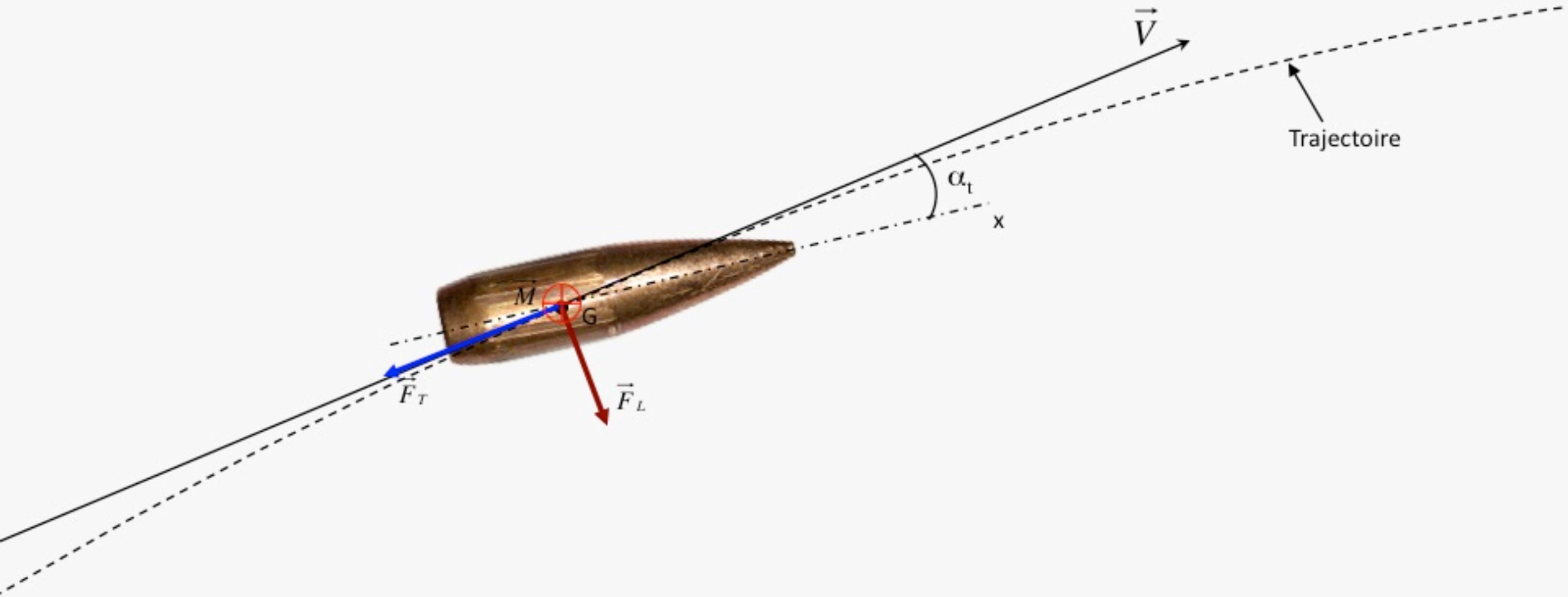
Force de plané : $\frac{1}{2}\rho V^2 S C_{L\alpha} \sin\alpha_t$

☞ $\alpha_t = o \Rightarrow F_L = 0$



Balistique extérieure

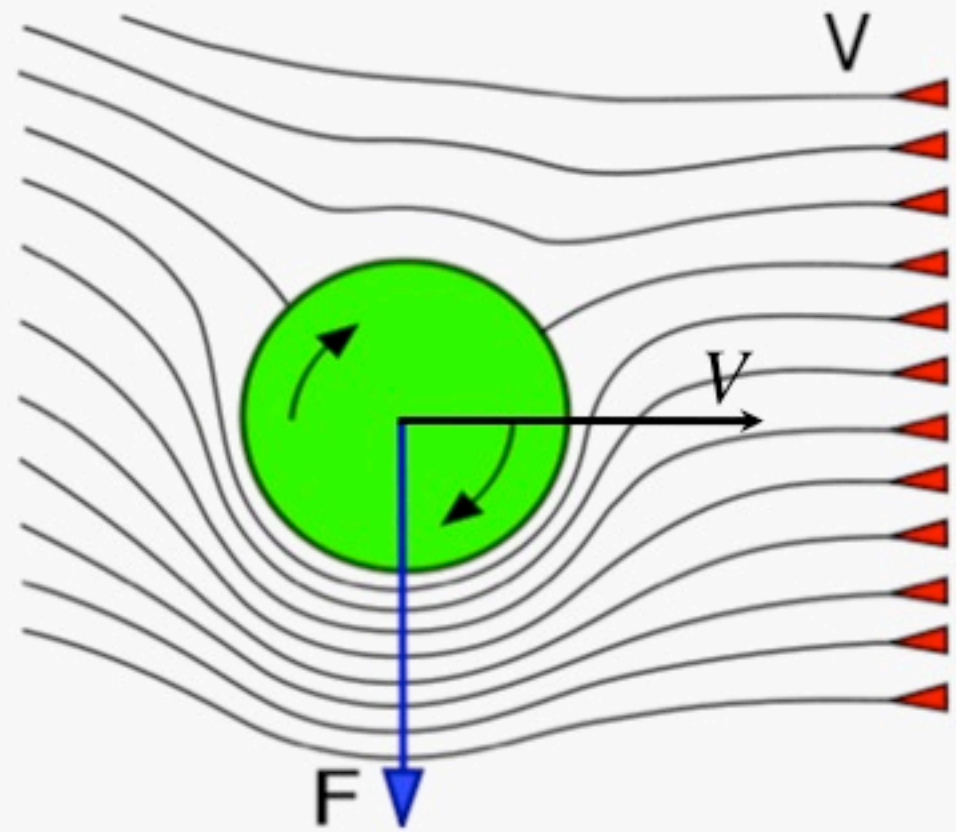
☞ La direction de la force F_L dépend de la position du nez du projectile par rapport au vecteur vitesse



➢ L'effet Magnus

☞Les particules d'air sont accélérées lorsque leur vitesse est de même sens que celle du cylindre et freinées dans le cas contraire

☞La pression augmente là où elles sont freinées et diminue là où elles sont accélérées. $\Delta p \rightarrow F$



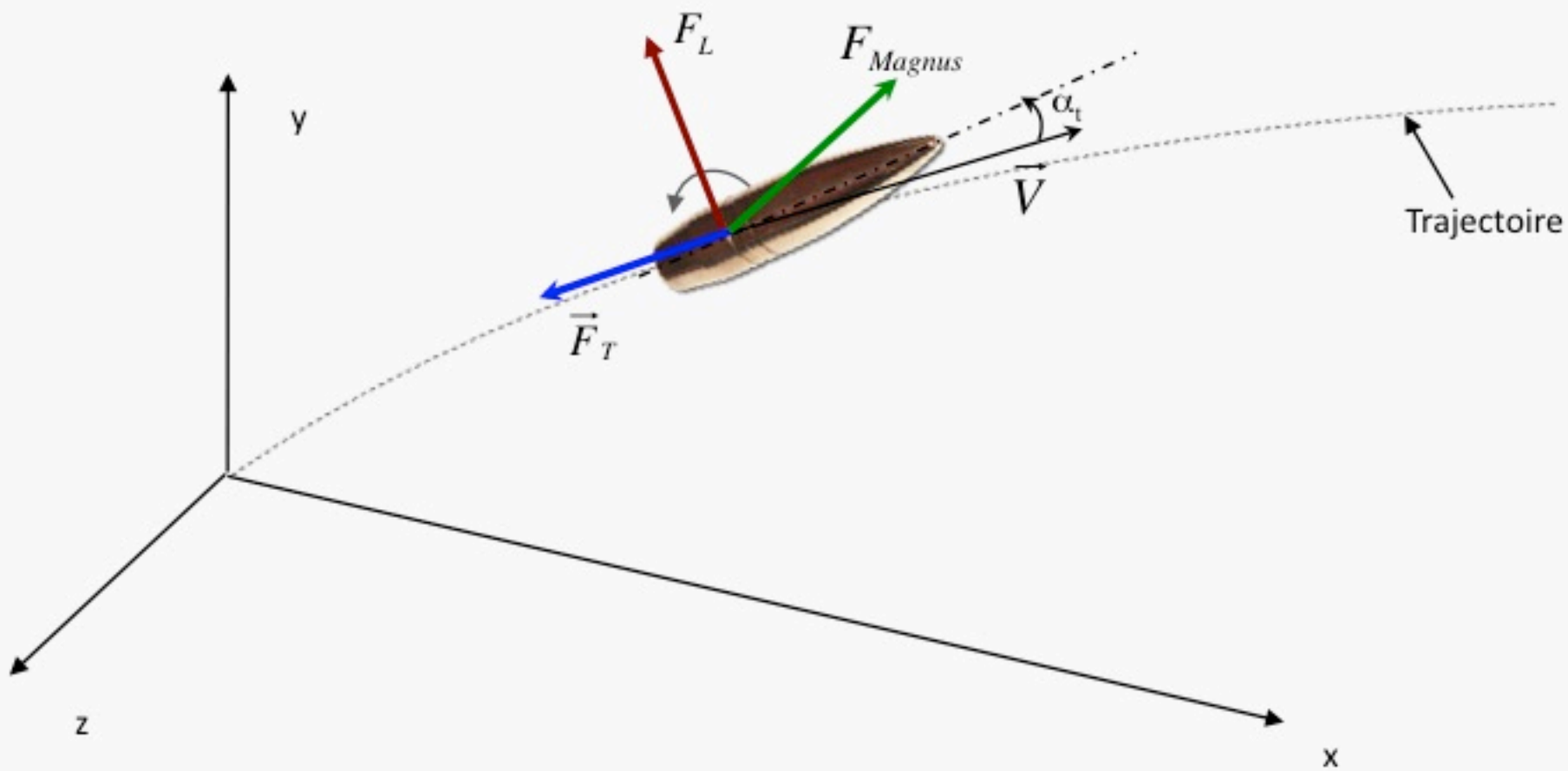
Force due à l'effet Magnus

$$\frac{1}{2}\rho V^2 S\left(\frac{\omega d}{V}\right) C_{N_{\omega\alpha}} \sin\alpha_t$$

ω: vitesse de rotation du projectile
d : diamètre de référence du proj.
$C_{N\omega\alpha}$: Coefficient de le force de Magnus
α_t : obliquité totale

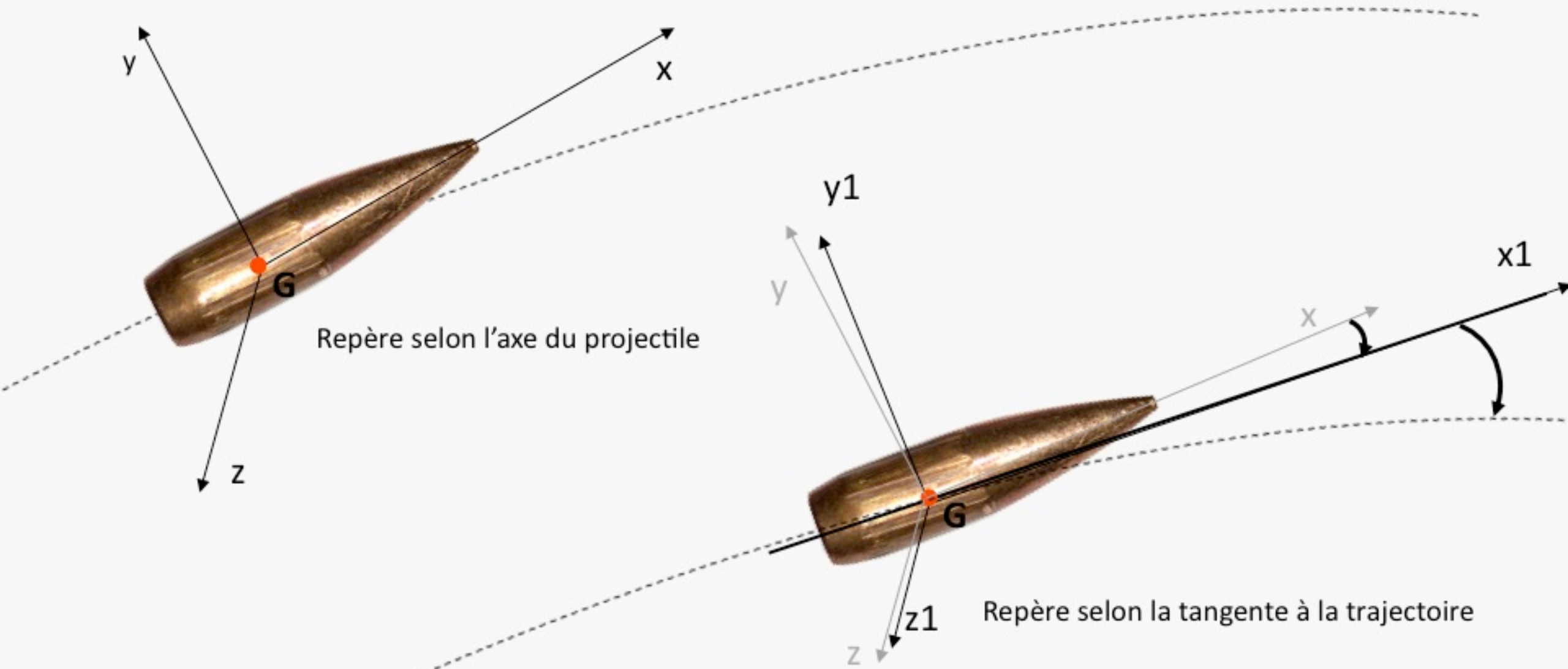
☞ Si $\alpha_t = 0$ ou $\omega = 0$ => pas de force de Magnus

- Force de Magnus



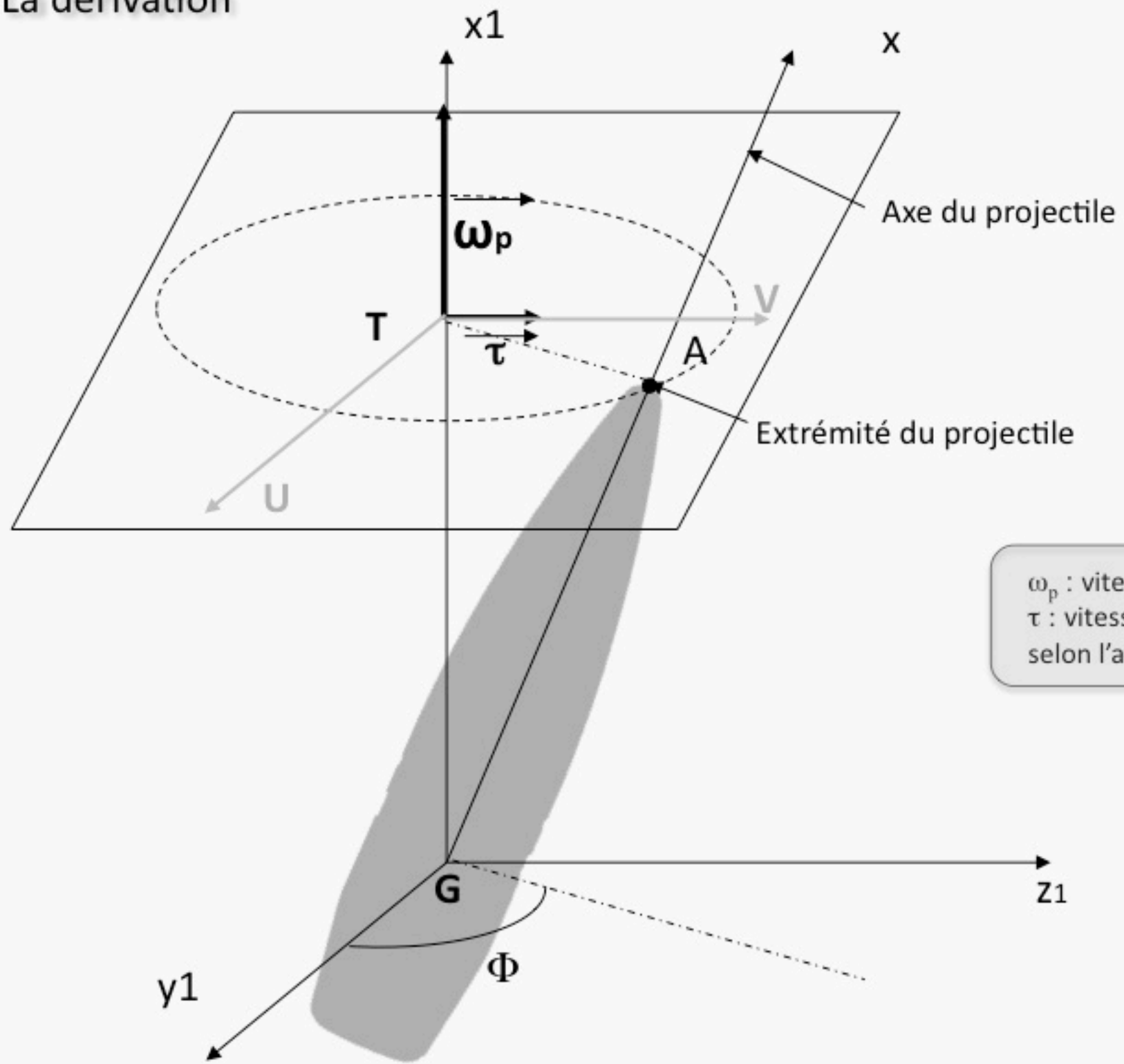
Balistique extérieure

- La dérivation



☞Selon les lois de la mécanique rationnelle, un corps en rotation et en translation a tendance à aligner son axe de rotation avec la tangente à sa trajectoire. Dans une trajectoire courbe, le projectile « court » après la tangente

- La dérivation

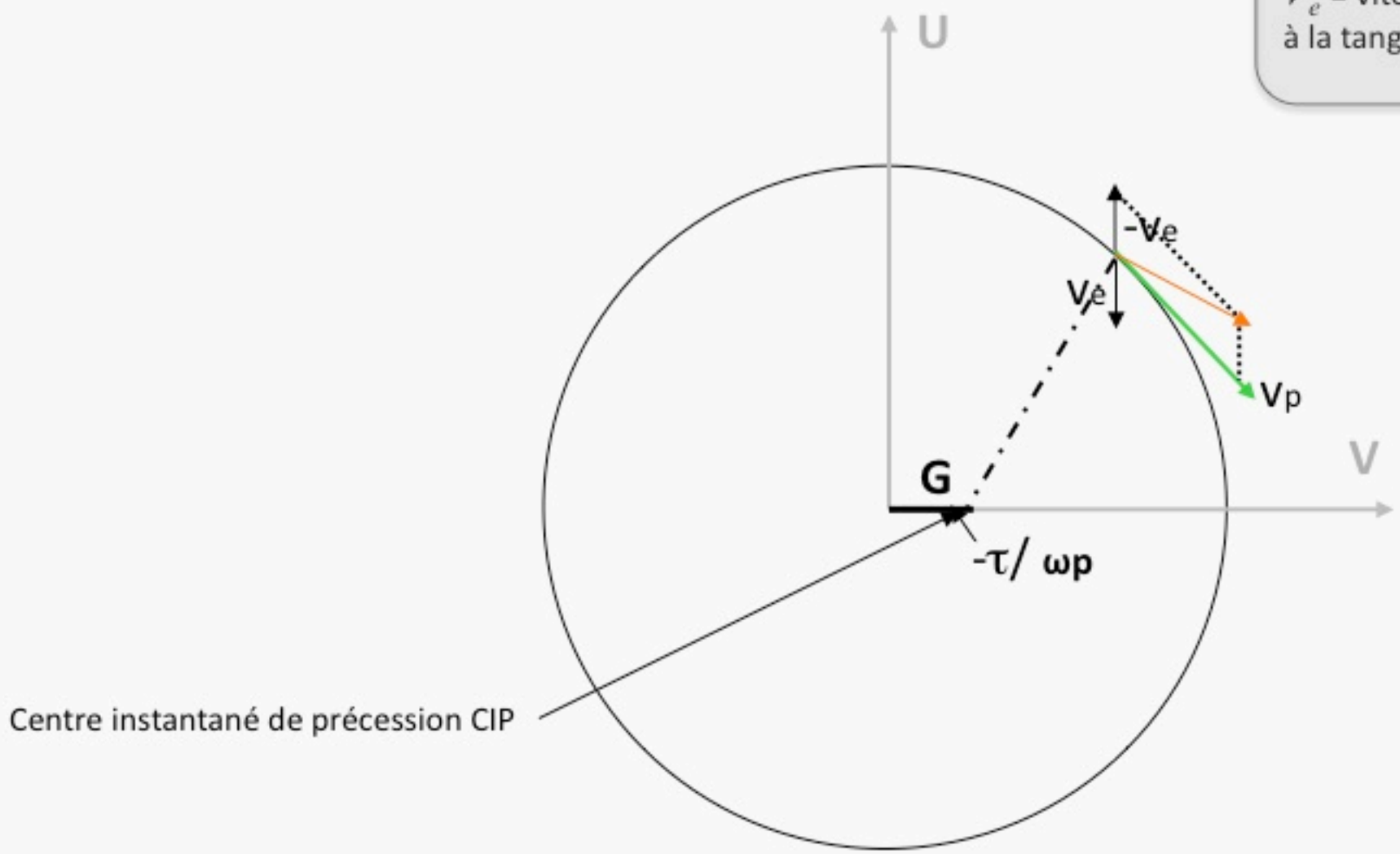


ω_p : vitesse angulaire de précession
τ : vitesse angulaire de rotation selon l'axe transversal du projectile

- La dérivation

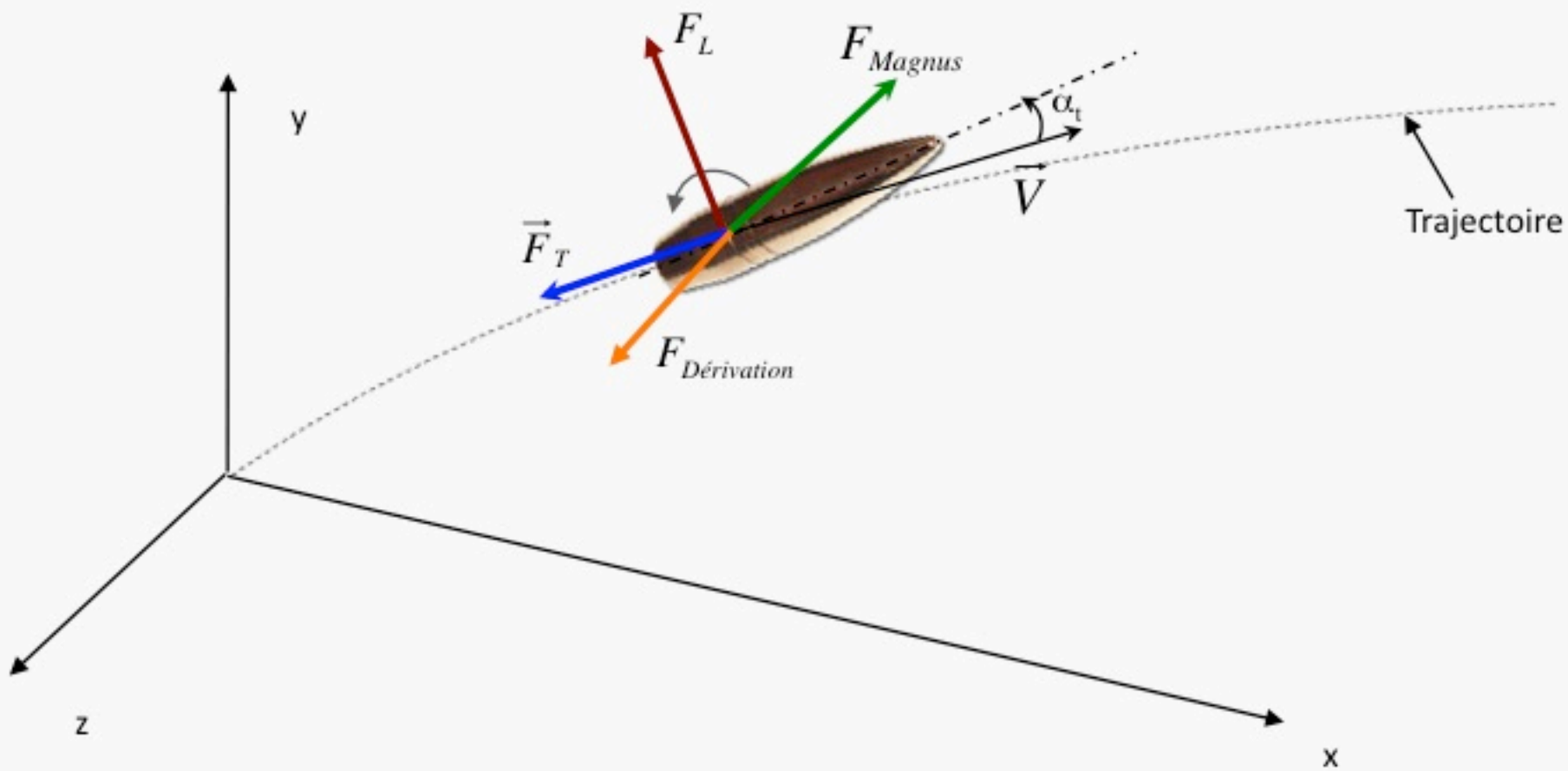
V_p = vitesse de précession

V_e = vitesse d'entraînement par rapport à la tangente



Vue de l'arrière

- La dérivation



☞ La dérivation est une composante des altérations latérales

Trajectoire rectiligne => τ=0 -> pas de dérivation

LA RETARDATION

LES LOIS DE FREINAGE

Jean-Jacques DÖRRZAPF

- La force de traînée – La retardation

$$F_T = \frac{1}{2}\rho V^2 \frac{\pi d^2}{4} C_T\left(\frac{\rho V L}{\mu}, \frac{V}{a}\right)$$

Avec $C_T\left(\frac{\rho V L}{\mu}, \frac{V}{a}\right)$ le coefficient de traînée (sans dimension)

- Le coefficient de traînée

✓ Forme complète

$$C_T = C_{T_0} + C_{T_{\delta^2}} \delta^2$$

Obliquité totale : $\delta = \sin \alpha_t = \sqrt{\left(\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}\right)^2 + \sin^2 \beta}$

Pour α et β petits (< 15 °) : $\alpha_t = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$

$C_{T_0} \rightarrow \alpha = \beta = 0$

Soit un projectile ->

Obliquité nulle

$$C_T = C_{T_0}$$

Obliquité non nulle

$$C_T = C_{T_0} + C_{T_{\delta^2}} \delta^2$$

✓ Paramètres du coefficient de traînée

- En toute rigueur (pour $\delta = 0$)

$$C_T = f\left(\frac{\rho UL}{\mu}, \frac{V}{a}\right)$$

Nombre de Mach $= \frac{V_{projectile}}{V_{son}}, V_{son} = a$

Nombre de Reynolds : $R = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$

U – vitesse du fluide (m/s)

L – longueur caractéristique (m)

ν – viscosité cinématique : $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ (m²/s)

ρ – masse vomumique (kg/m²)

μ – viscosité dynamique (Pa.s)

- En pratique (pour $\delta = 0$)

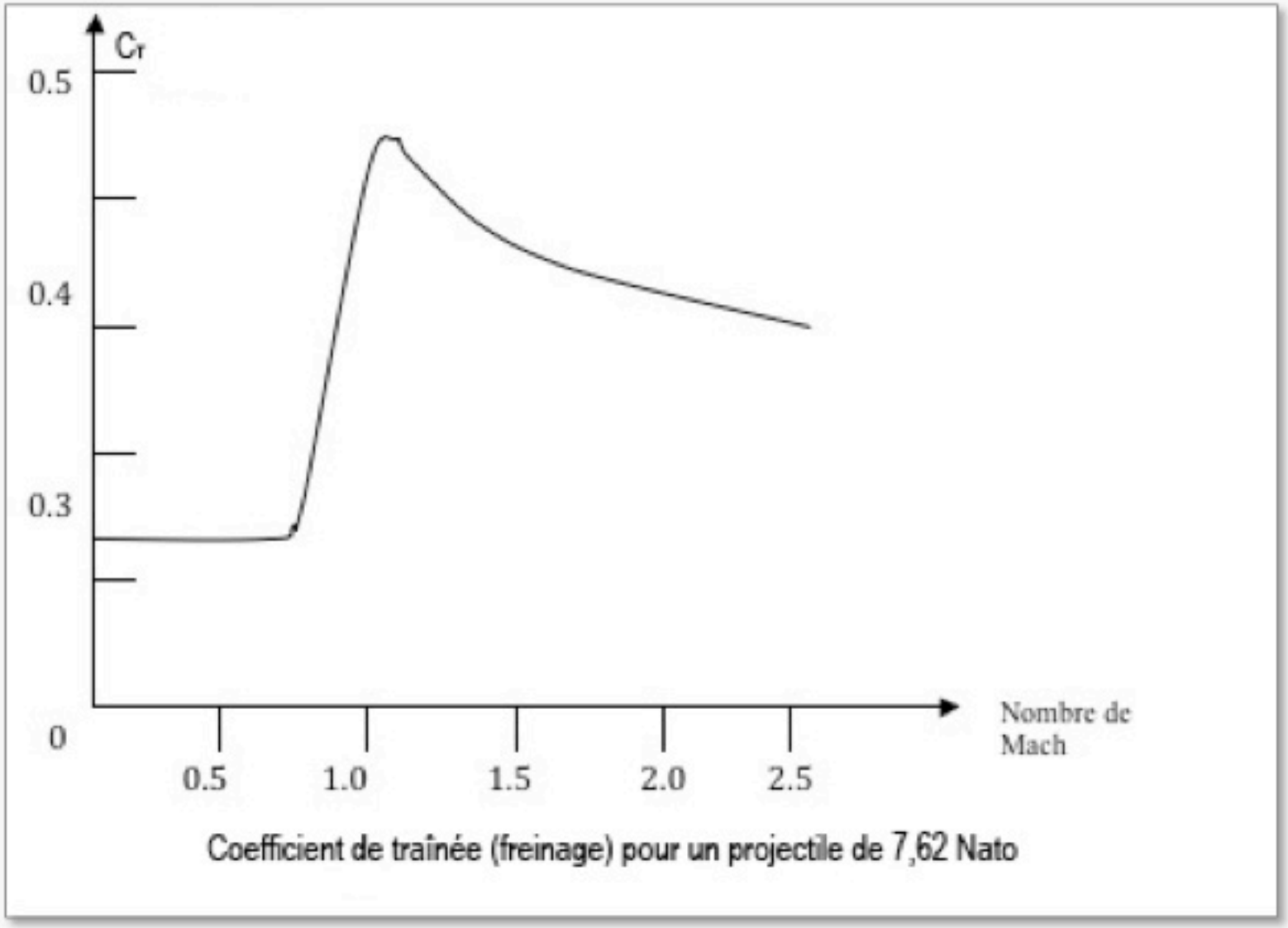
$$C_T = f\left(\frac{V}{a}\right)$$

Car on néglige l'influence du nombre de Reynolds

☞ Le coefficient de traînée varie avec le nombre de Mach

Balistique extérieure

☞ Le coefficient de traînée varie avec le nombre de Mach



☞ il est impossible de représenter le freinage par une seul équation généralisée

- Le coefficient balistique (en deux étapes)

  - 1ère étape

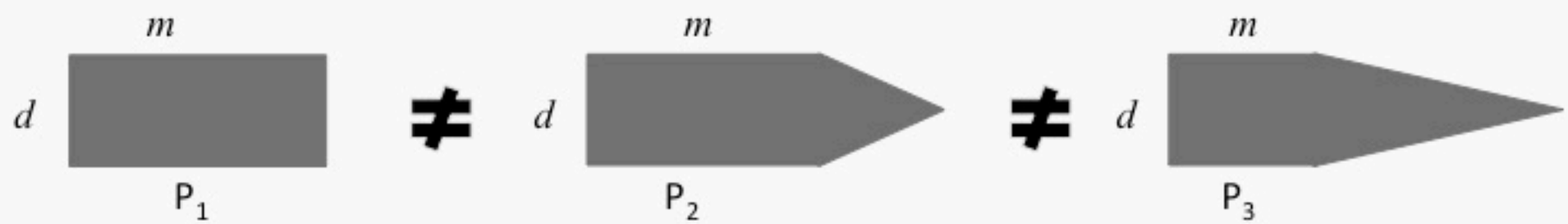
$$F_T = -\frac{1}{2}\rho V^2 S C_T = m\frac{dv}{dt} \Rightarrow \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2m}\rho V^2 S C_T = -\frac{1}{2m}\rho V^2 \frac{\pi d^2}{4} C_T$$

On introduit $$C_T^* = \frac{\rho S C_T}{2m} = \frac{\rho \pi d^2}{8m} C_T = \frac{\rho \pi}{8}\frac{C_T}{C}$$

Avec $C = \dfrac{m}{d^2}$ coefficient balistique

- 2ème étape

☞ Même s'il existe une égalité de masses et de diamètres



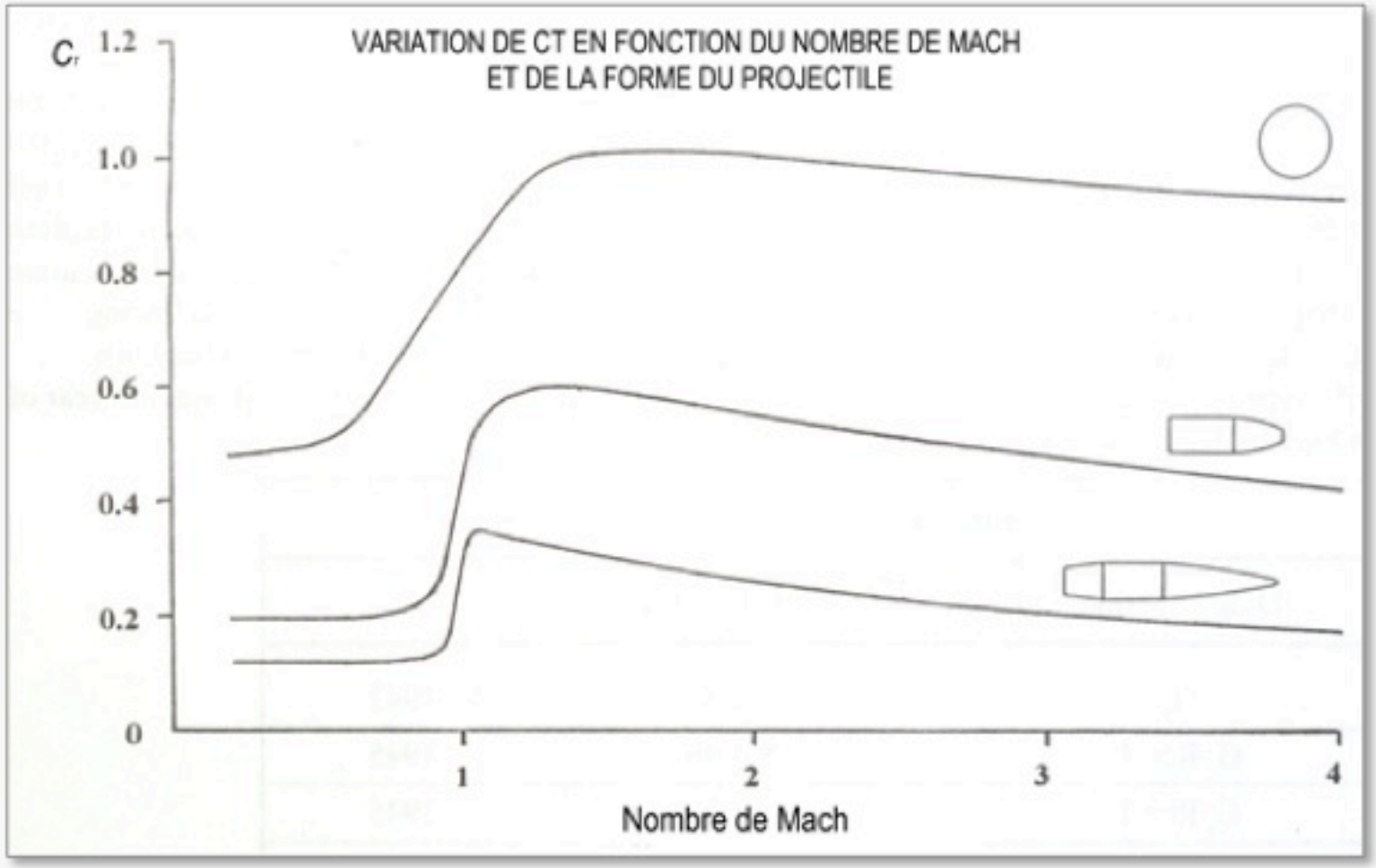
☞ P_1, P_2 et P_3 ont une pénétration dans l'air différente => $C_1 \neq C_2 \neq C_3$

=> Il faut introduire un nouveau paramètre : le facteur de forme i

Coefficient balistique définitif $\boxed{C = \dfrac{m}{id^2}}$

Balistique extérieure

☞ Le coefficient de traînée varie avec la forme du projectile



Balistique extérieure

- Le coefficient balistique généralisé, le facteur de forme et les tables balistiques

Coefficient balistique généralisé

$$C_j = \left(\frac{m}{i_j d^2}\right)\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$$

j : précise le type de table utilisé pour un projectile normalisé
ρ_0 : densité de l'air standard au niveau de la mer (ICAO) *International Civil Aviation Organisation*

Facteur de forme

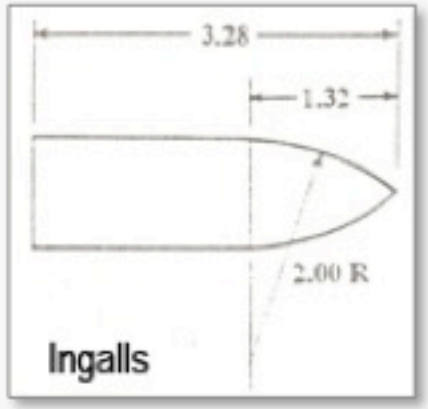
$$i_j = \left(\frac{C_T}{C_{T_j}}\right)_{moyen} \Rightarrow C_T = i_j C_{T_j}$$

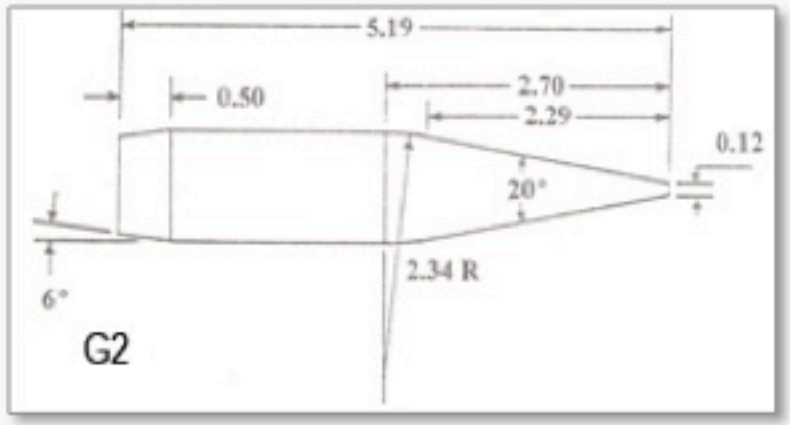
☞ i_j est le rapport moyen du coefficient de traînée d'un projectile donné à celui d'un projectile normalisé déterminé expérimentalement

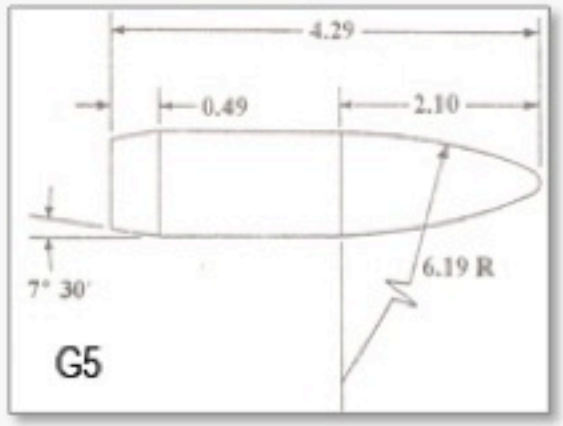
Balistique extérieure

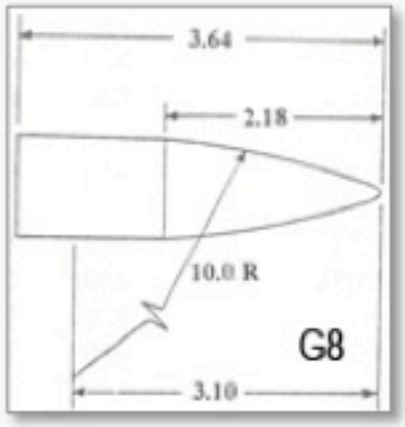
- Quelques projectiles étalons et un abaque de correspondance

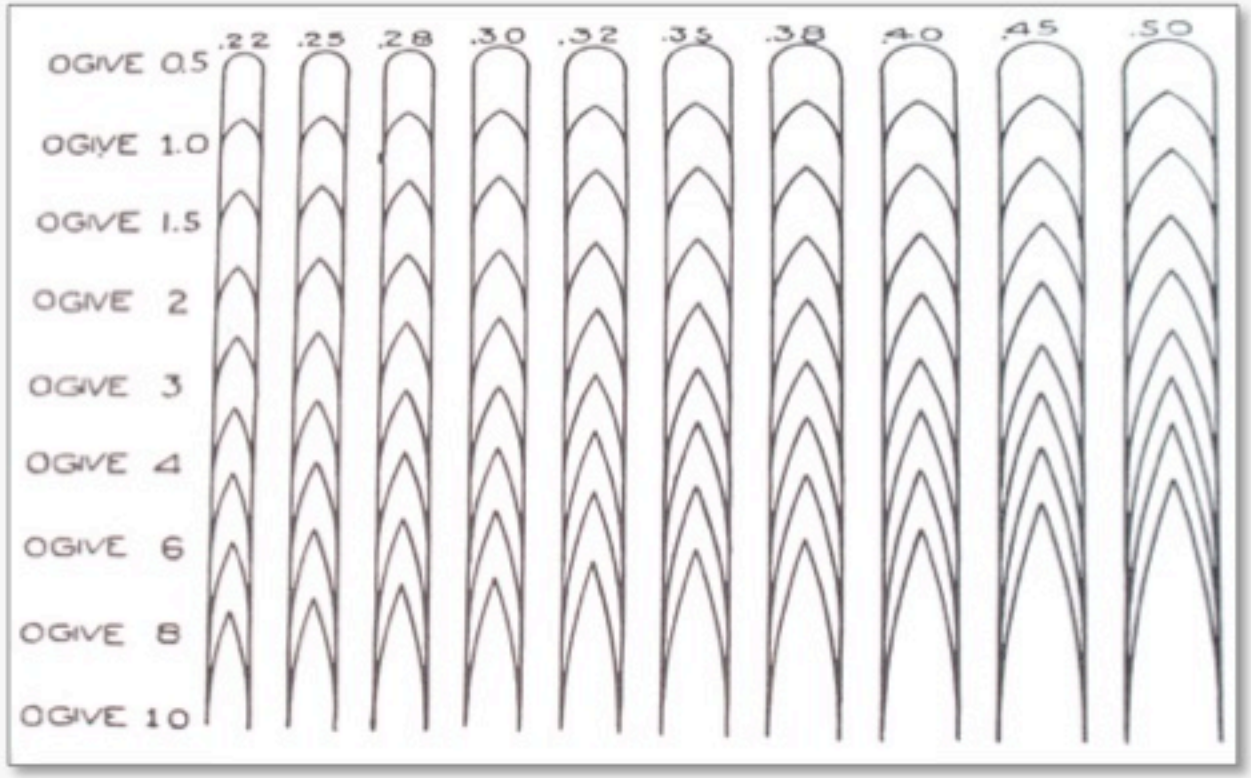
Quelques exemples (Ingalls, G_2, G_5, G_8 : côtes en calibre)











- Approche simplificatrice

On peut considérer trois formes de coefficient de freinage

1 C_T constant $M<1$

2 C_T inversement proportionnel au nombre de Mach pour des vitesses $M>>1$

3 C_T inversement proportionnel à la racine carrée du nombre de Mach pour $M \geq 1$

- Exemple avec C_T constant – Loi du carré de la vitesse

*Valable pour les projectiles subsoniques ou sur des distances de tirs courtes

$$F_R = -\frac{1}{2}\rho S V^2 C_T \rightarrow \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2m}\rho S V^2 C_T \rightarrow \frac{dV}{V} = -kVdt \quad \text{avec} \quad k = \frac{1}{2m}\rho S C_T$$

En intégrant : $\int_{v_0}^{v} \frac{1}{V} dV = -kVt = \left[\ln V\right]_0^v$ soit $\ln\frac{V}{V_0} = -kx$

Finalement : $V = V_0 e^{-kx}$

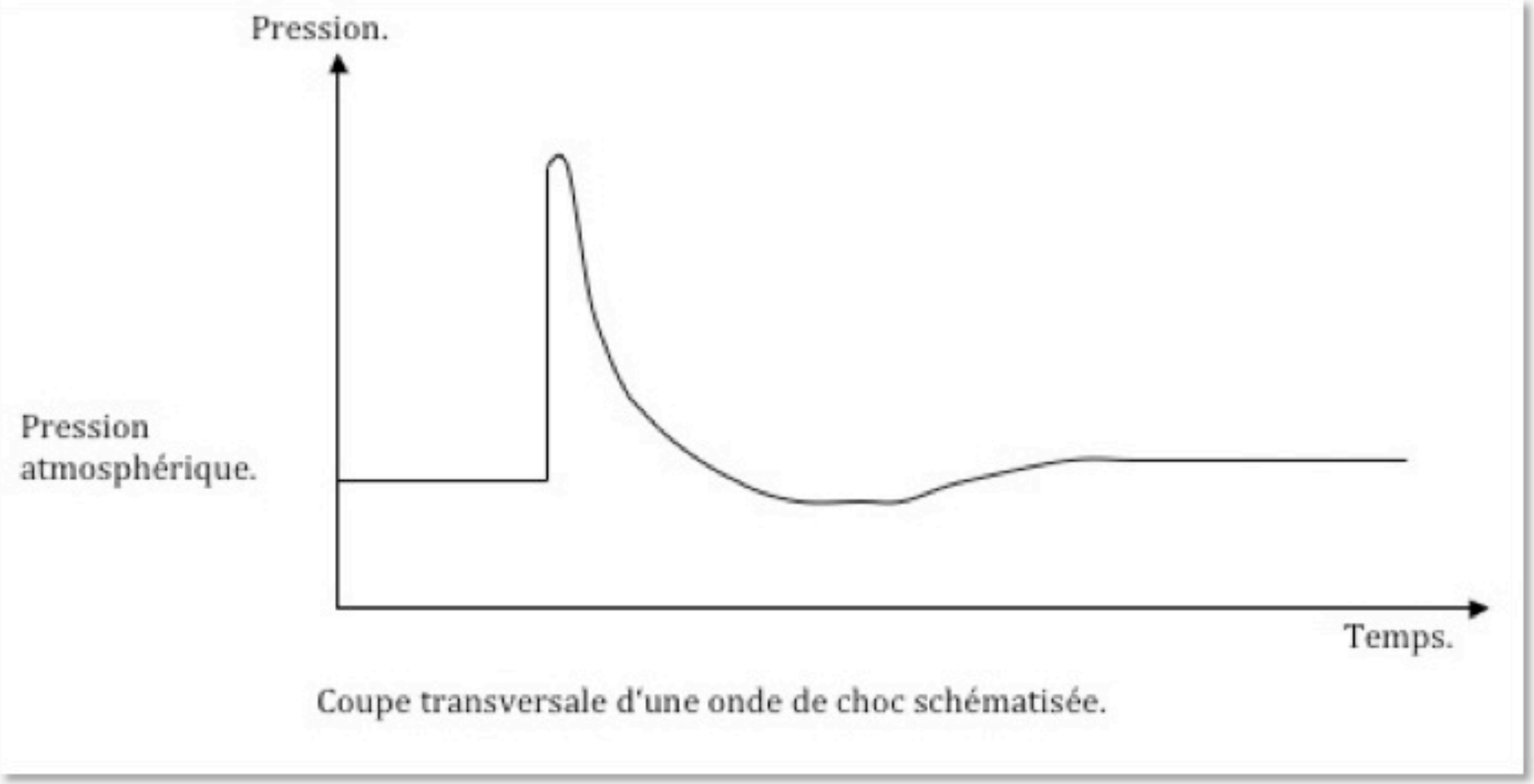
k se détermine expérimentalement en prenant les vitesses V_1 et V_2 du projectile en deux points x_1 et x_2 de sa trajectoire

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_0 e^{-kx_2}}{V_0 e^{-kx_1}} = e^{(kx_1 - kx_2)} \Rightarrow \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = k(x_1 - x_2) \Rightarrow \frac{\ln V_2 - \ln V_1}{x_1 - x_2} = k$$

ONDE DE CHOC – ONDE DE MACH

Jean-Jacques DÖRRZAPF

- Ondes de choc



Coupe transversale d'une onde de choc schématisée.

☞ Une onde de choc est une variation brutale de certains paramètres physiques

➢ Principales caractéristiques de l'onde de choc

☞ La vitesse relative de l'onde augmente avec l'amplitude du choc

☞ La vitesse du son derrière l'onde de choc est toujours supérieure à celle de l'onde

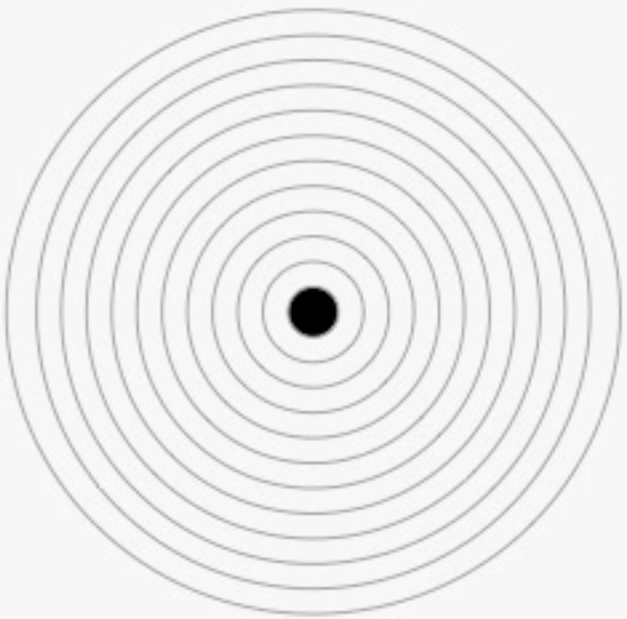
☞ Une onde de choc est toujours subsonique par rapport au milieu derrière elle

☞ Le choc est toujours supersonique par rapport au milieu qu'il rencontre

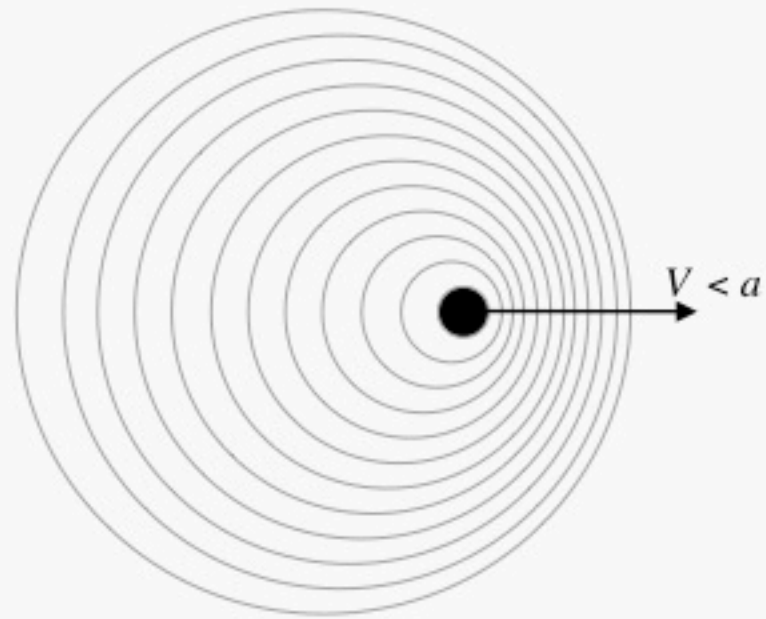
☞ Une onde de choc n'est pas une onde d'accélération (qui se propage à la vitesse du son)

- Onde de Mach

☞ Le son est dû à l'ébranlement des molécules du milieu (air…)



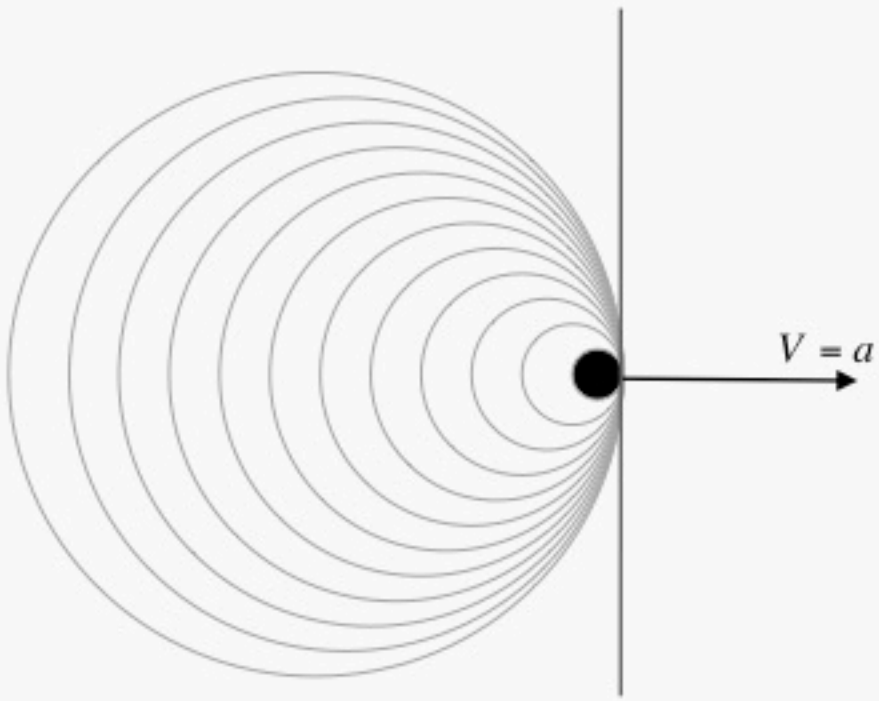
Source d'excitation immobile
ondes concentriques



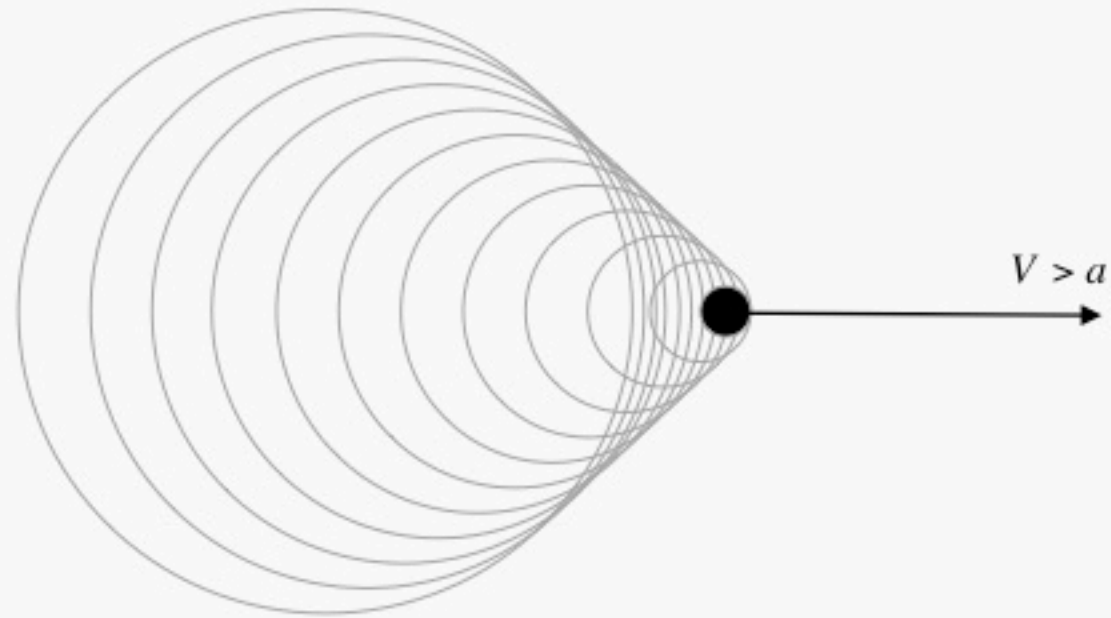
Source d'ébranlement en déplacement subsonique
Les ondes ne sont plus concentriques
- Augmentation de la fréquence à l'avant
- Diminution à l'arrière
(Effet Doppler)

Balistique extérieure

- Onde de Mach



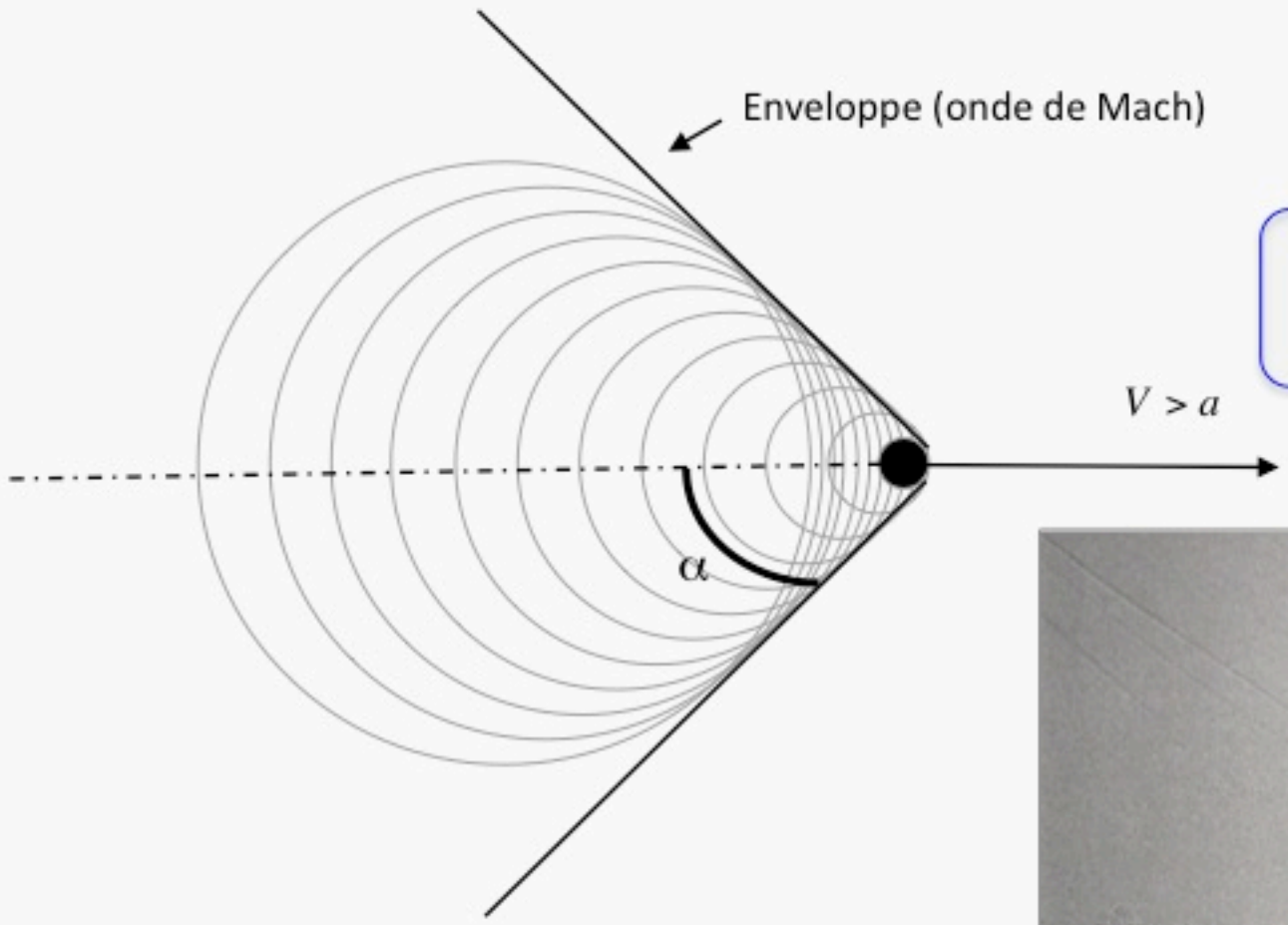
Source d'ébranlement en déplacement transsonique
Les ondes se superposent à l'avant



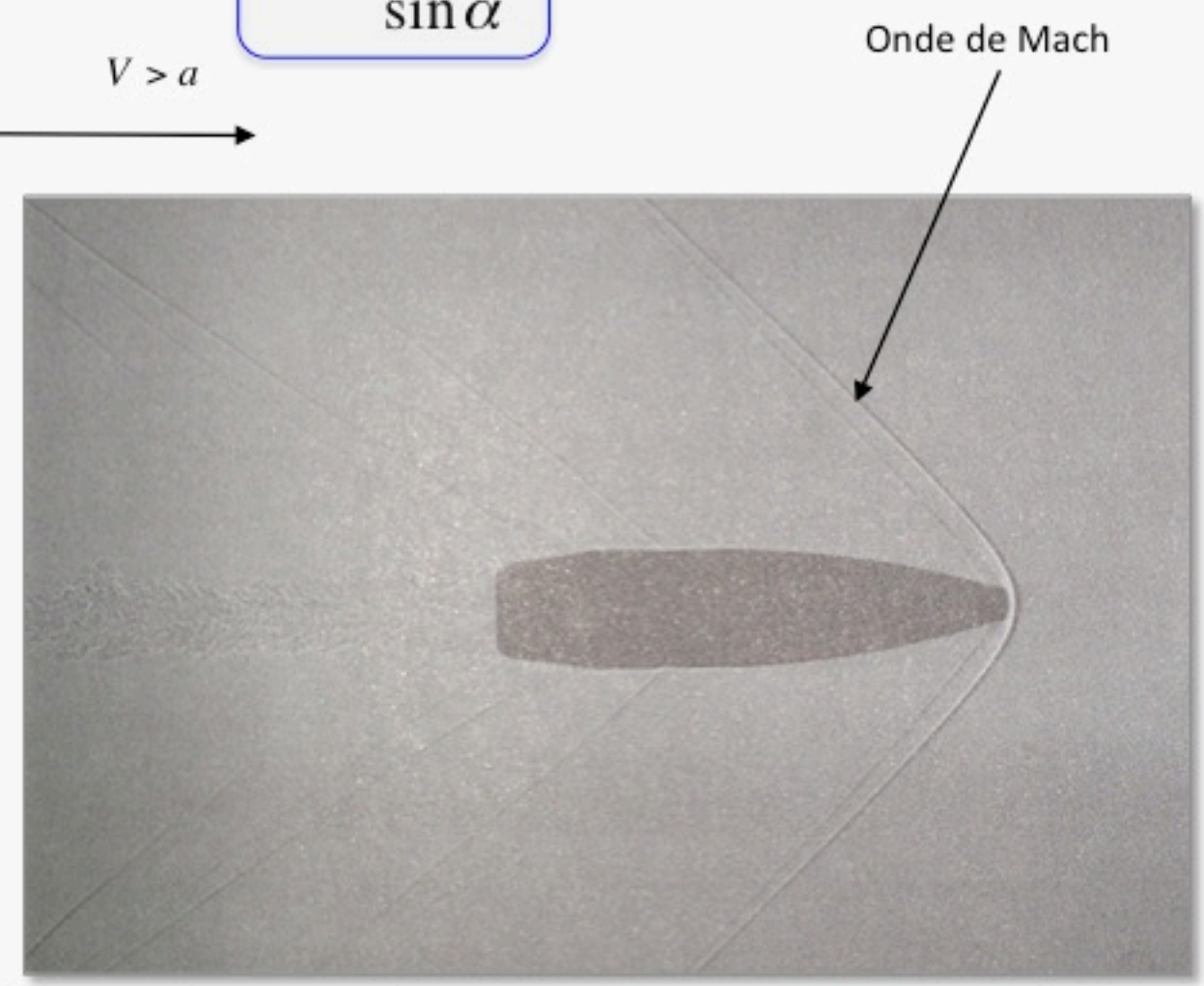
Source d'excitation en déplacement supersonique
Les ondes se superposent sur les côtés
Elles forment une enveloppe conique
Onde de sillage – onde de Mach

Balistique extérieure

- Ondes de choc – onde de Mach



$$V = \frac{a}{\sin\alpha}$$



Mach 1,3

EUROBALLISTICS

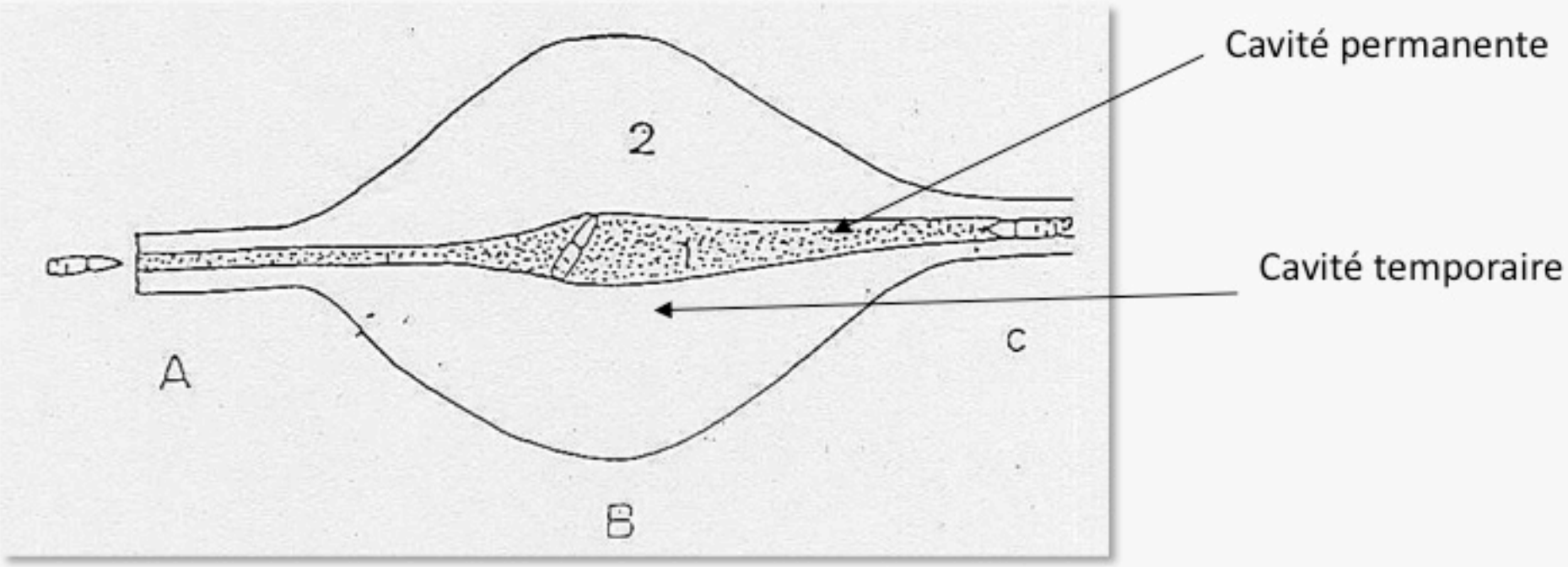
3ème CONGRÈS
de
BALISTIQUE LÉSIONNELLE

LA BALISTIQUE LÉSIONNELLE

Jean-Jacques DÖRRZAPF

Balistique lésionnelle

- La notion de profil lésionnel



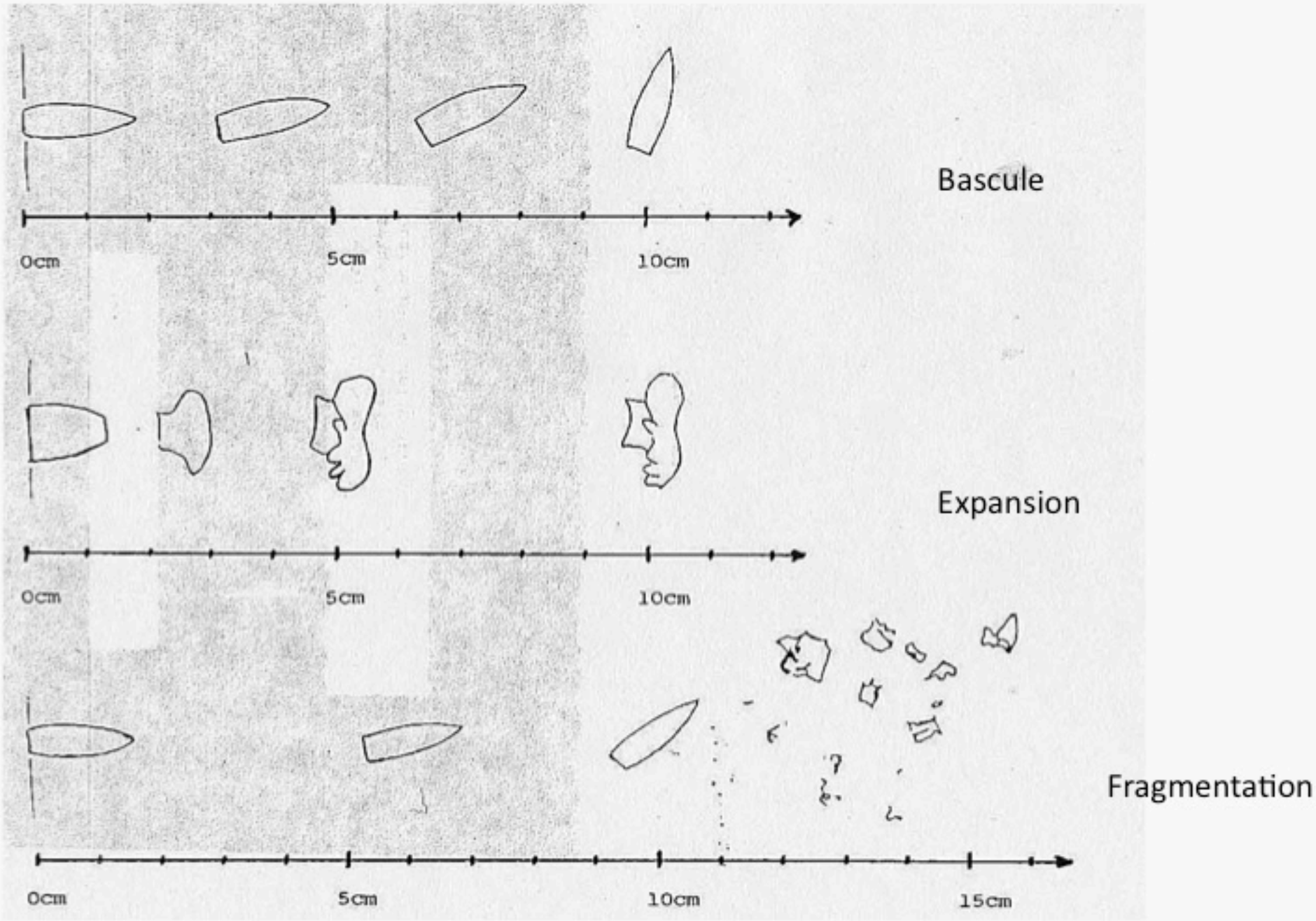
A : trajet proximal (Neck)

B : Zone de bascule ou de champignonnage

C : Trajet distal

Balistique lésionnelle

- Les principales causes de lésions projectilaires



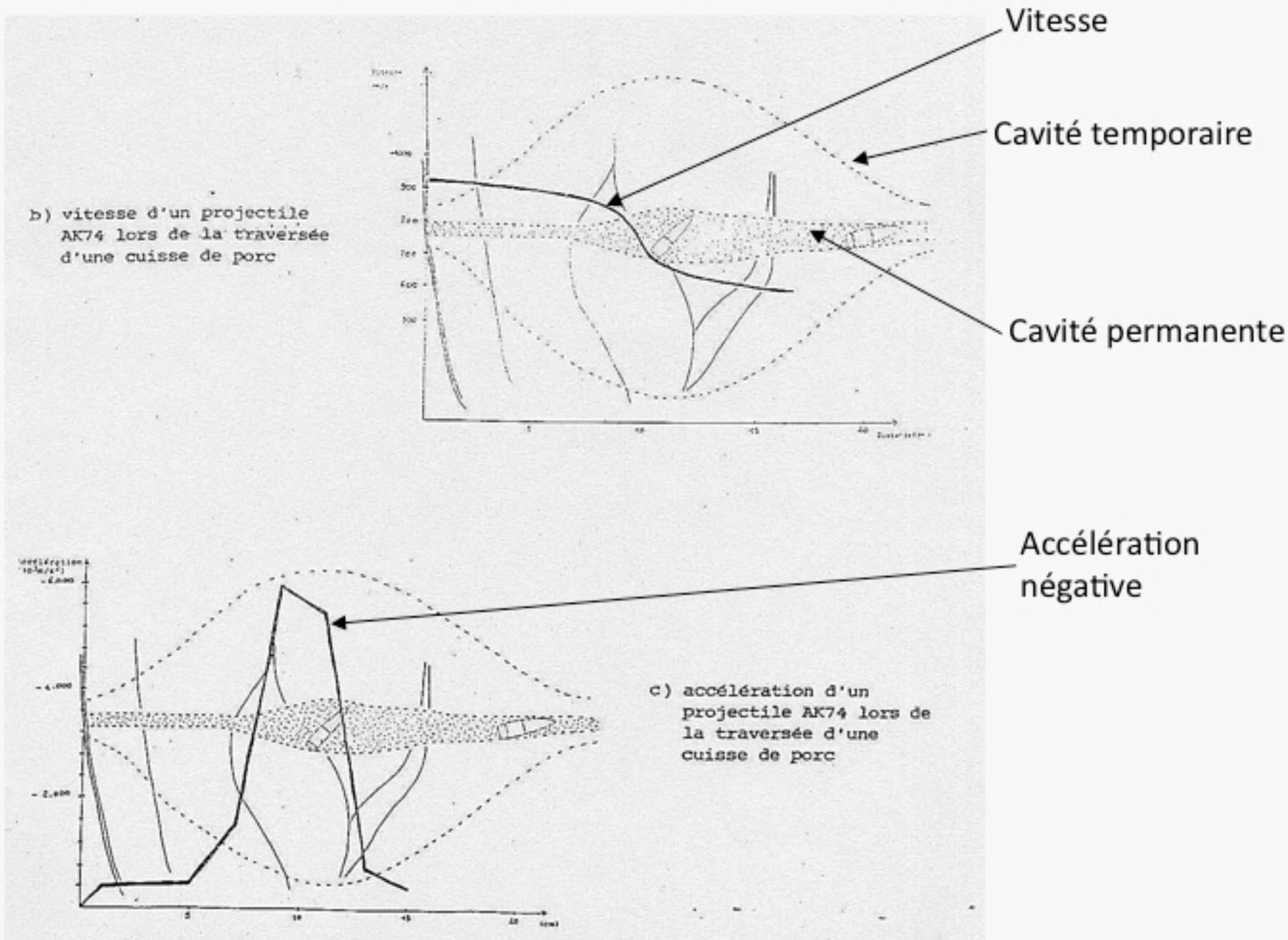
Balistique lésionnelle

- Corrélation bascule – freinage – distance parcourue

$$F = m\frac{dv}{dt} = ma$$

$$Fdt = mdv$$

$$Fx = \frac{1}{2}mV^2$$

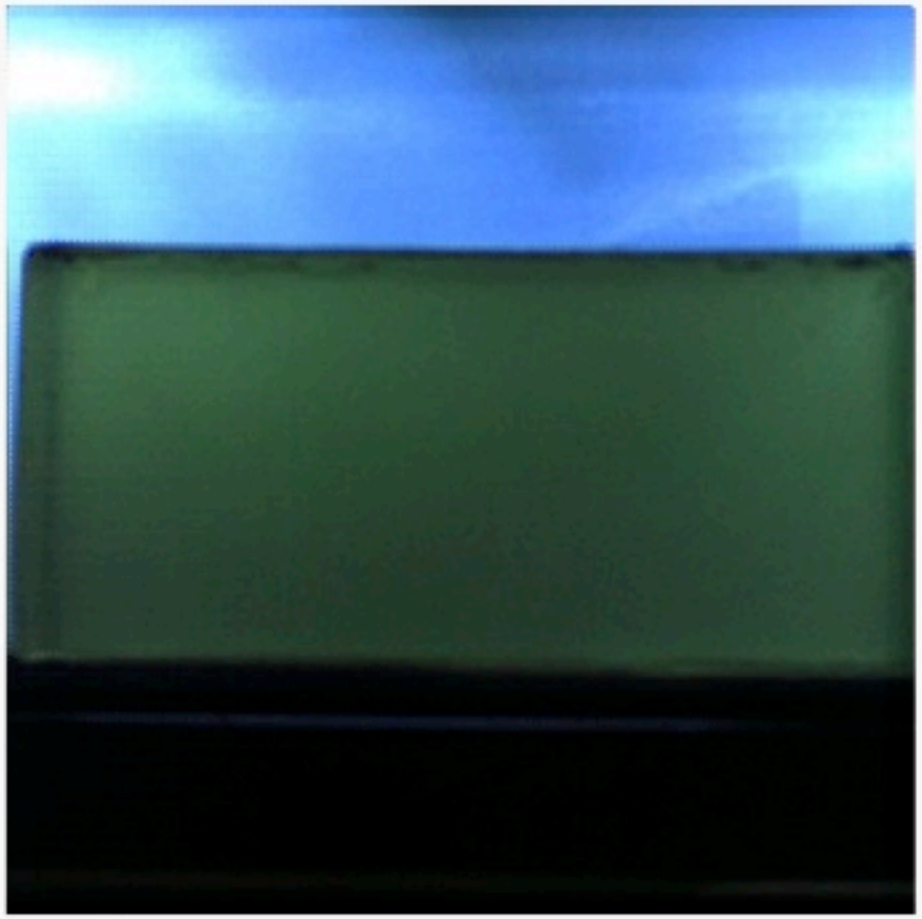


Balistique lésionnelle

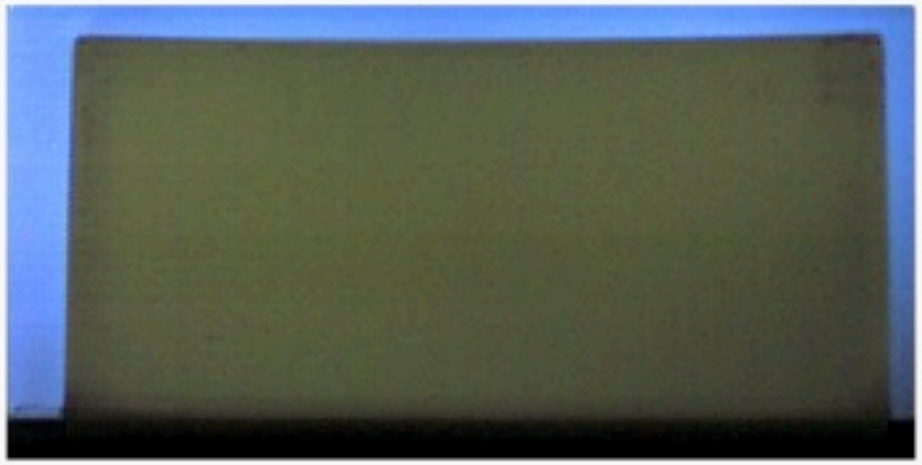
☞Dans le cas des matériaux biologiques la densité, de même que le nombre de Reynolds sont insuffisants

AK 74, v ≈ 890 m/s. Gélatine à 10 % et 20 %, T=5°.

Balistique lésionnelle



AK 74, v ≈ 890 m/s. Gélatine à 10 %,T=5°.



AK 74, v ≈ 890 m/s. Gélatine à 20 %, T=5°.

FIN