

AE 41 Ecoulements Compressibles

**Emmanuel Benard
ISAE/SupAéro**

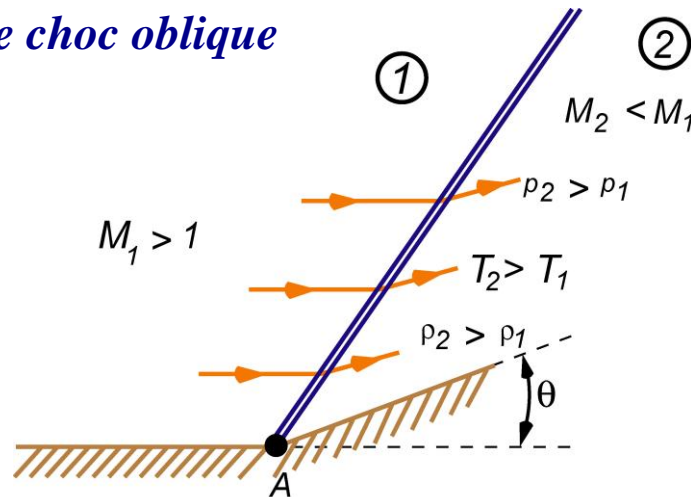
**Elements extraits des cours de:
ENSICA/SupAéro/ENSMA**

Cours C7

- 1. Ondes de Mach***
- 2. Onde de choc oblique***
- 3. Réflexion d'onde sur une paroi***
- 4. Croisement d'ondes de même / différentes familles***

Écoulement ne décolle pas *i.e.* toujours parallèle à la paroi (ou à la ligne de glissement)

Onde de choc oblique

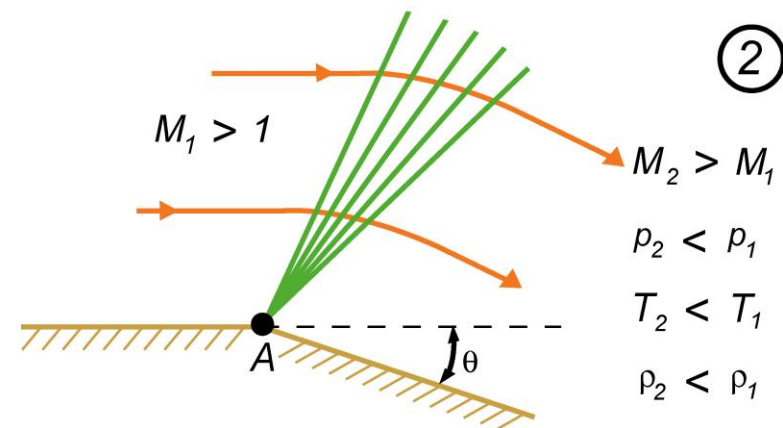


Choc droit = cas particulier des chocs obliques

Isentropique en amont et en aval – pas au travers

Déviations brusques de l'écoulement

① Détente de Prandtl-Meyer

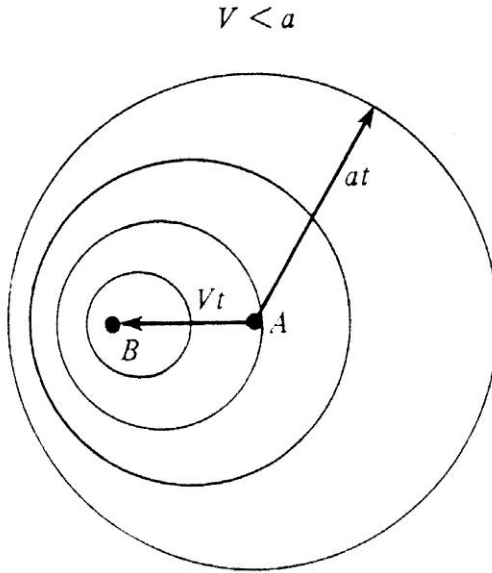


« Choc de détente »

Détente = antithèse du choc

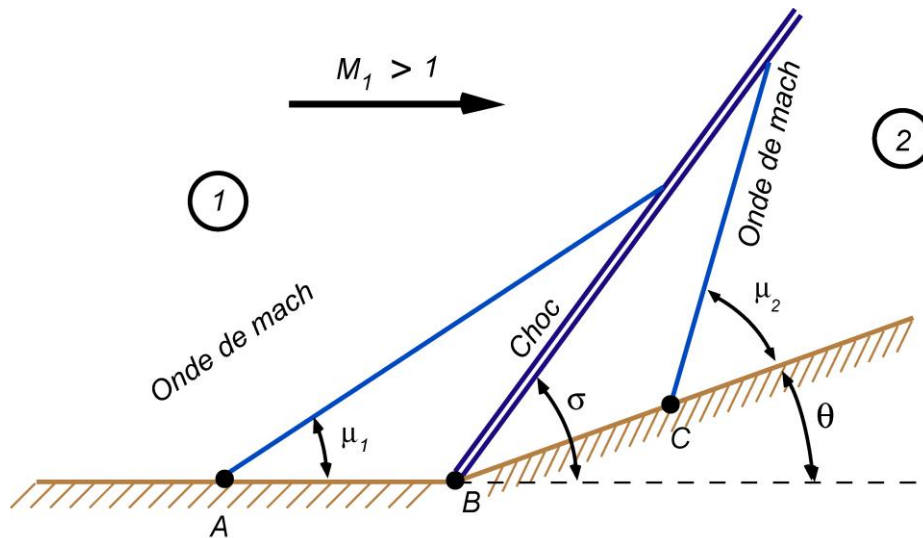
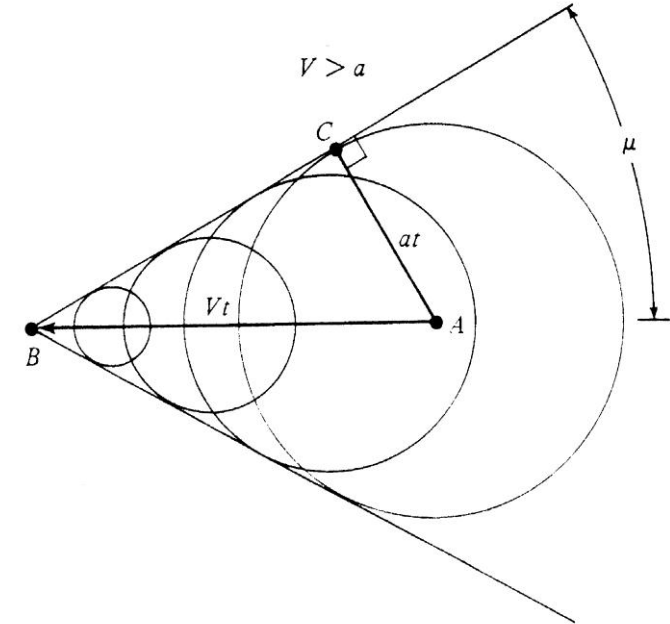
Phénomène continu

Processus isentropique



$$\sin \mu = \frac{at}{Vt} = \frac{a}{V} = \frac{1}{M}$$

$$\mu = \arcsin \frac{1}{M}$$



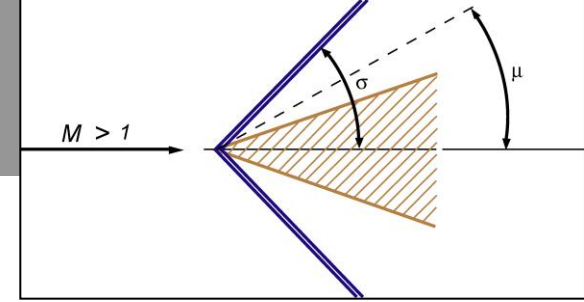
Ondes de Mach

- Caractéristiques montantes C^+
- Caractéristiques descendantes C^-

Repérage des angles

Onde de choc oblique - Faisceau de détente

Onde de choc oblique

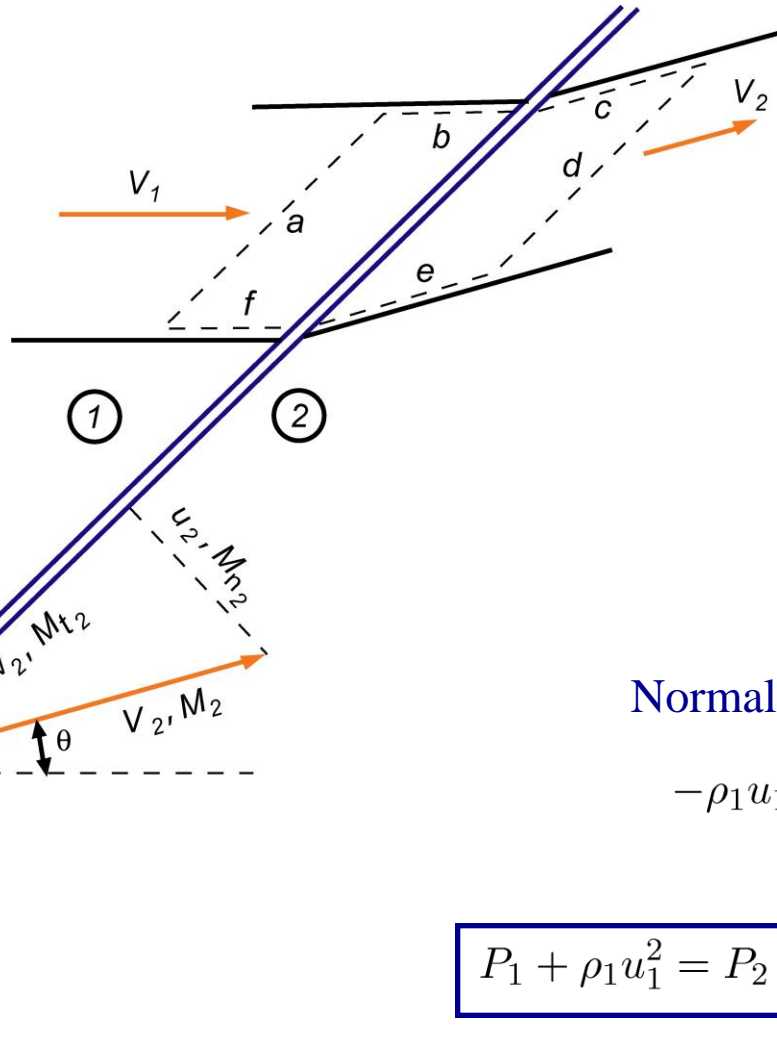


$$\iint_S \rho \vec{V} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$-\rho_1 u_1 S_1 + \rho_2 u_2 S_2 = 0$$



$$\boxed{\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2}$$



$$\iint_s (\rho \vec{V} \cdot d\vec{s}) \vec{V} = - \iint_s P \cdot d\vec{s}$$

Tangentiel

$$-\rho_1 u_1 v_1 + \rho_2 u_2 v_2 = 0$$



$$\boxed{v_1 = v_2}$$

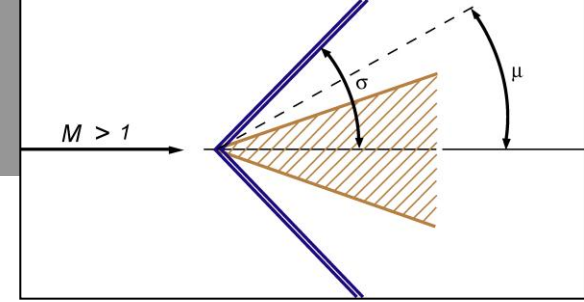
Normal

$$-\rho_1 u_1 u_1 + \rho_2 u_2 u_2 = P_1 - P_2$$

$$\boxed{P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2}$$

Onde de choc oblique - Faisceau de détente

Onde de choc oblique



$$\iint_S \rho \left[e + \frac{V^2}{2} \right] \vec{V} \cdot d\vec{s} = \dot{Q} - \iint_S P \vec{V} \cdot d\vec{s}$$

$$-(-P_1 u_1 + P_2 u_2) = -\rho_1 \left(e_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) u_1 + \rho_2 \left(e_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) u_2$$

$$\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \rho_1 u_1 = \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \rho_2 u_2 \longrightarrow h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

$$V^2 = u^2 + v^2 \longrightarrow V_1^2 - V_2^2 = (u_1^2 + v_1^2) - (u_2^2 + v_2^2) = u_1^2 - u_2^2$$

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2}$$

Bilan projection normale
identique au choc droit

$$\mathbf{M}_I \longrightarrow \mathbf{M}_{nI}$$

$$M_{n1} = M_1 \sin \sigma$$

Rappel

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

Normal

$$P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2$$

Tangentiel

$$v_1 = v_2$$

Conservation de la vitesse tangentielle

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_{n1}^2 - 1) \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma + 1)M_{n1}^2}{2 + (\gamma - 1)M_{n1}^2} \quad M_{n2}^2 = \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2}M_{n1}^2}{\gamma M_{n1}^2 - \frac{\gamma - 1}{2}}$$

$$M_2 = \frac{M_{n2}}{\sin(\sigma - \theta)}$$

Choc droit : fonction d' un seul paramètre M_I

Choc oblique : fonction de M_I et σ (*Pb ouvert*)

Relation entre $M_I - \theta - \sigma$

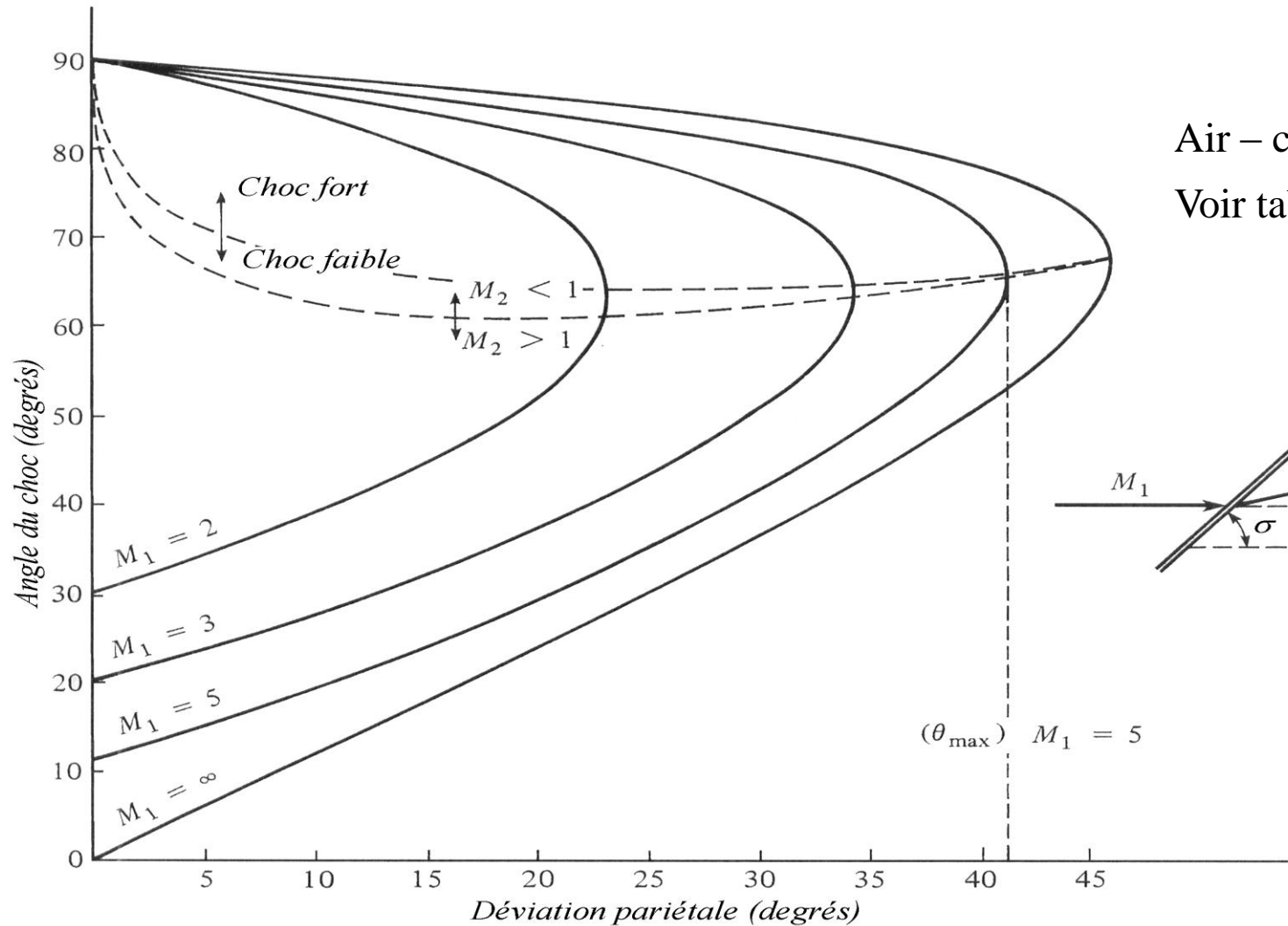
$$\tan \sigma = \frac{u_1}{v_1}$$

$$\tan(\sigma - \theta) = \frac{u_2}{v_2}$$

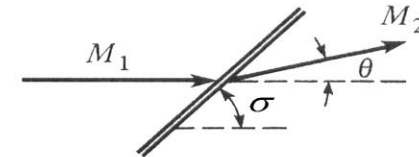
$$v_1 = v_2$$

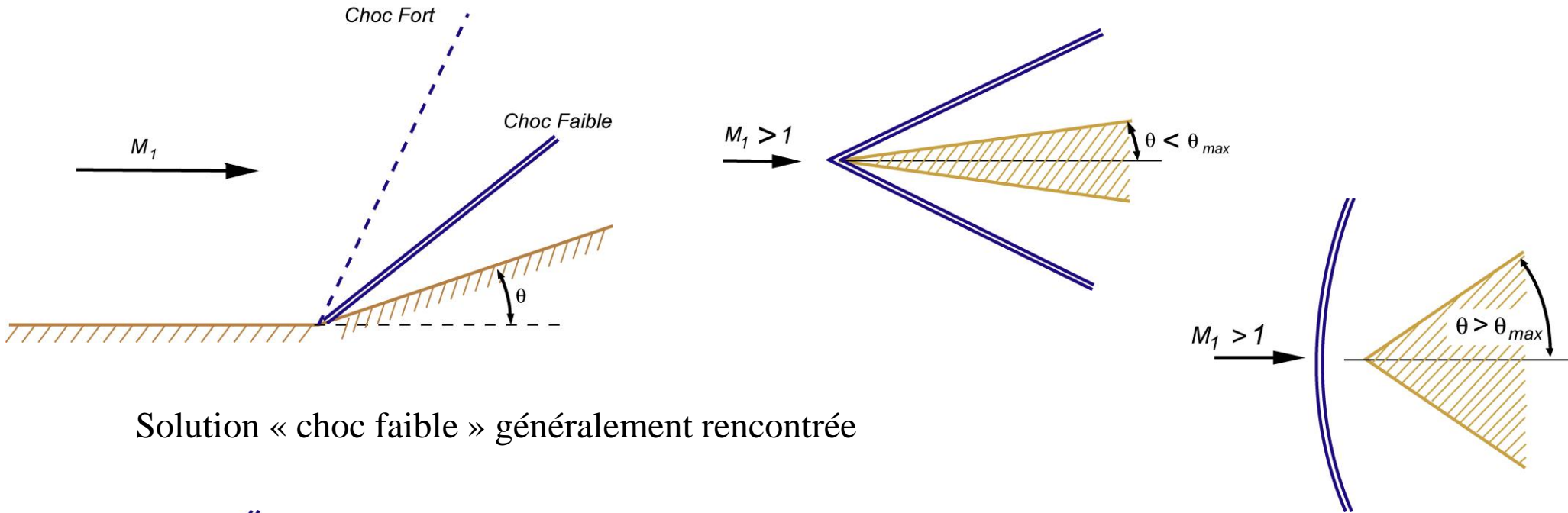
$$\frac{\tan(\sigma - \theta)}{\tan \sigma} = \frac{u_2}{u_1}$$

$$\frac{\tan(\sigma - \theta)}{\tan \sigma} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2 \sin^2 \sigma}{(\gamma + 1)M_1^2 \sin^2 \sigma}$$

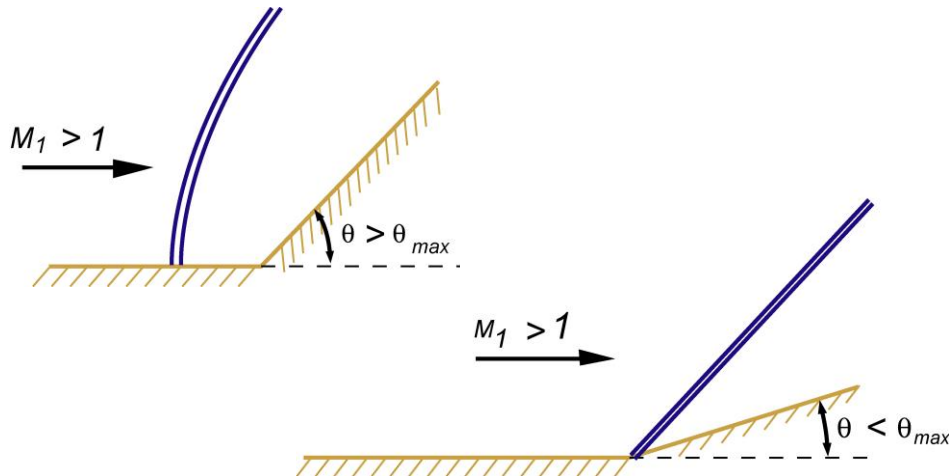


Air – conditions standards
Voir tables de choc





Solution « choc faible » généralement rencontrée

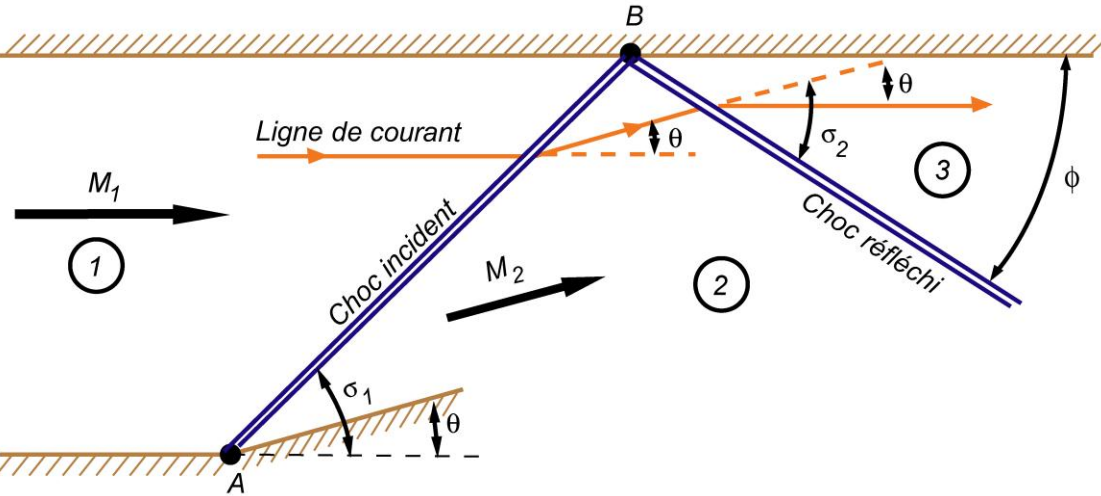


Si M_1 fixé et θ augmente :

P_2 , T_2 , ρ_2 et σ augmentent
 M_2 diminue

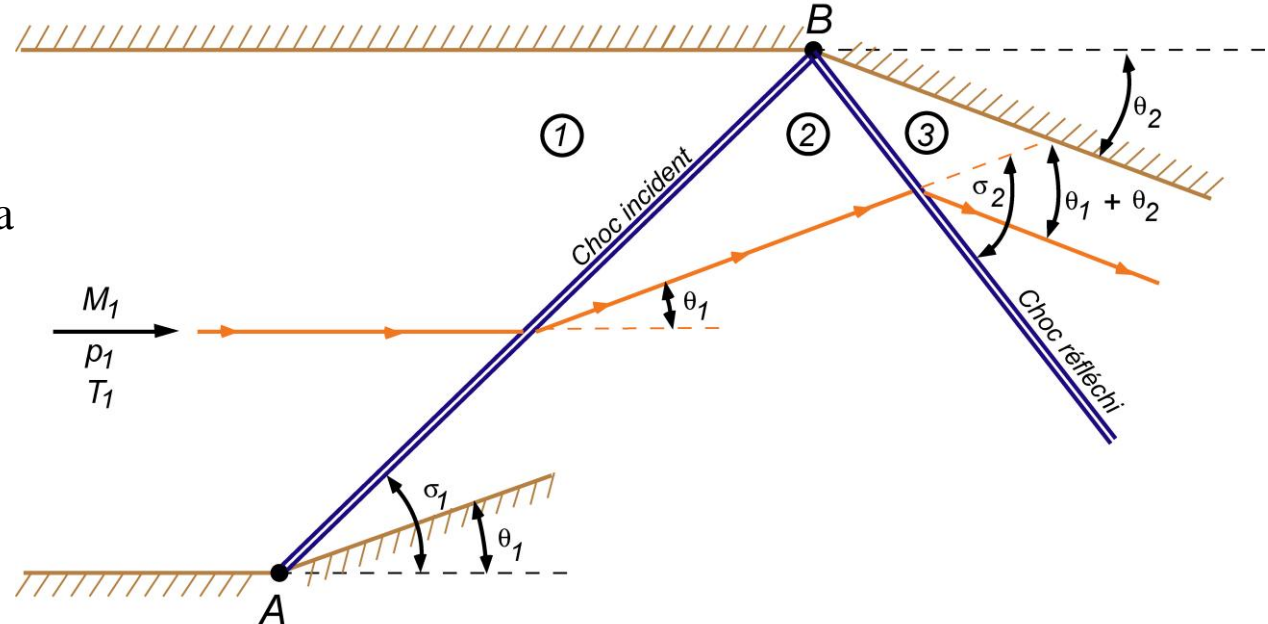
Si θ fixé et M_1 augmente à partir de 1 :

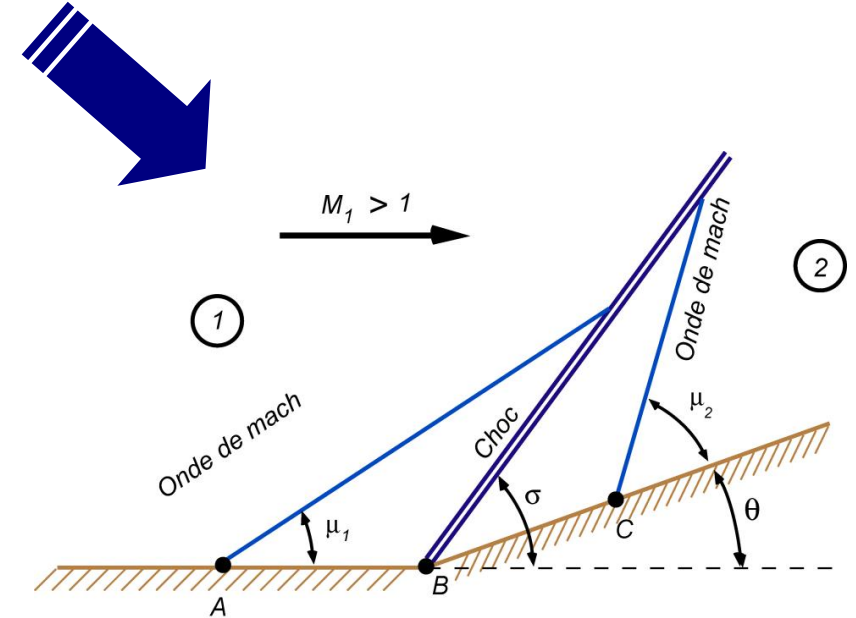
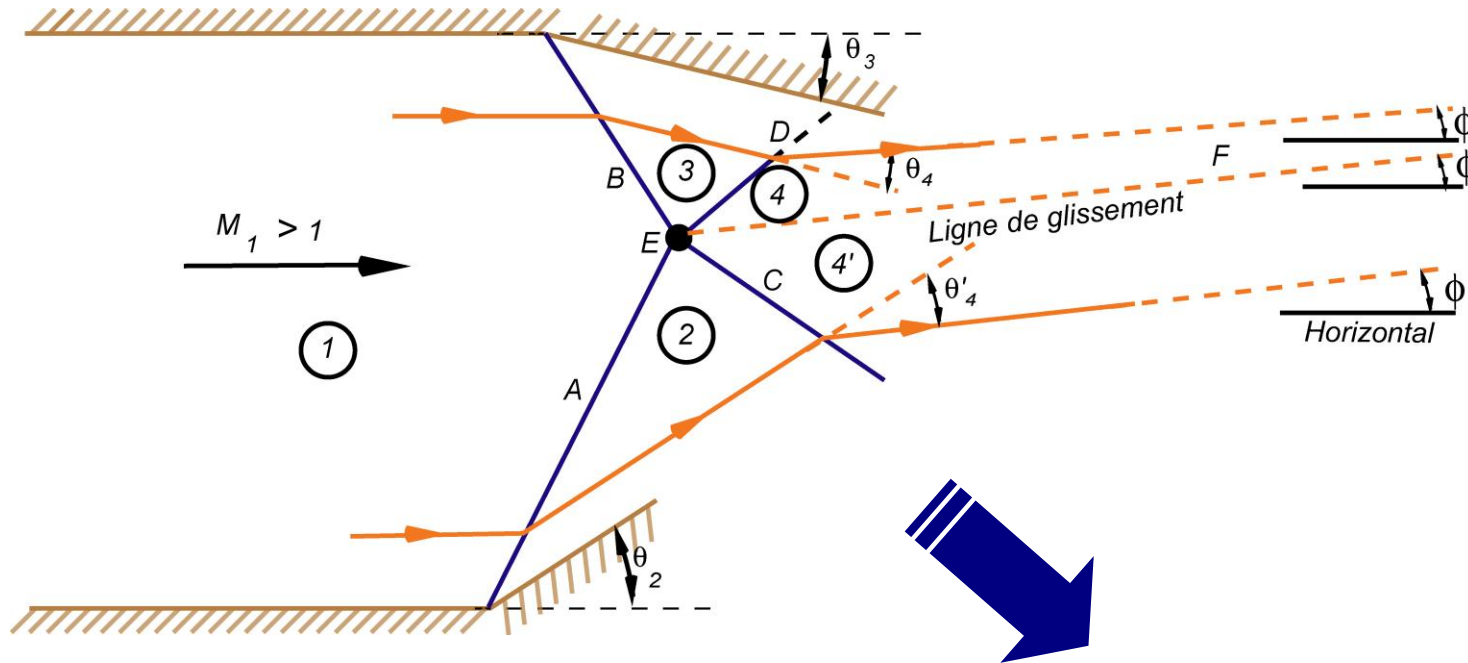
onde de choc détachée, puis attachée et
 σ diminue progressivement



- Réflexion ou absorption du choc en paroi ?
- Nature de la réflexion ? Justifier
- Intensité de la réflexion / incident ?
- Angle du choc réfléchi / incident ?

- Influence de l'orientation de la paroi en B ?
- Mise en place des repères de calculs des chocs ?

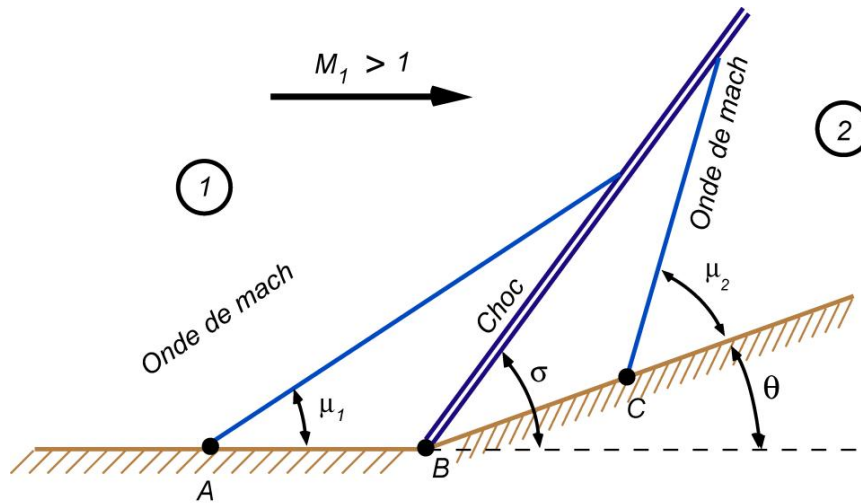




Calcul de choc est un calcul local

Toujours se ramener à une situation simple

Apparition de lignes de glissement



Onde réfléchi : choc faible ou détente
en fonction des conditions angulaires
 θ_1 et θ_2

Comparaison de P_{i5}/P_{i1} et de P_{i4}/P_{i1}

