

Séance de Travaux Dirigés 4



Étude d'une rampe de compression supersonique

Objectifs de la séance

1. vous familiariser avec les techniques spécifiques aux écoulements compressibles (schémas, C. L.),
2. à mettre en place une démarche de raffinement local du maillage basée sur le gradient de pression,
3. étudier l'influence d'éloignement de la frontière supérieure sur le champ de Mach,
4. de mettre en évidence la prédiction du comportement des C.L. par la théorie des caractéristiques.

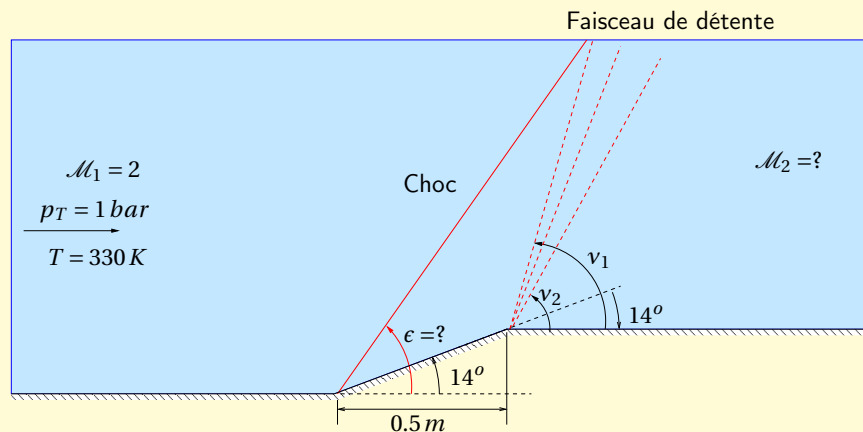
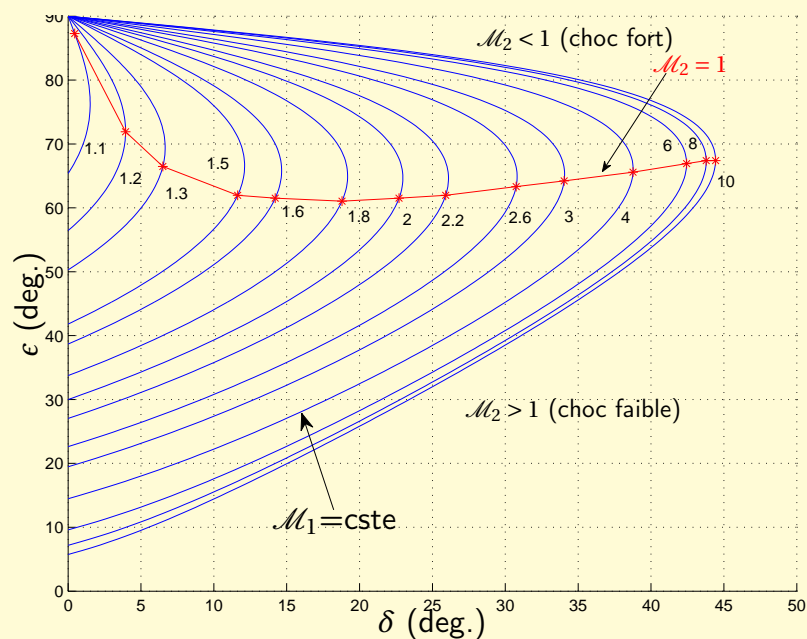


Figure 1 – Rampe de 14° dans un écoulement supersonique non visqueux

Les hypothèses de calcul sont : **calcul 2D plan, approche stationnaire, effets visqueux négligés.**

L'angle d'inclinaison du choc est à déterminer à partir de la polaire des chocs obliques :



Notation des angles :

1. δ pour l'angle de déflexion (ou de rampe),
2. ϵ pour l'angle de choc.

Cette session s'appuie sur vos connaissances acquises au préalable en matière :

1. d'extraction d'un plan de calcul 2D,
2. de report des conditions aux limites supposées à l'infini,
3. de mise en données d'un calcul CFD, calcul et post-traitement.

Seules les notions nouvelles font ici l'objet d'une présentation détaillée. Ne pas hésiter à vous reporter aux sessions précédentes pour le déroulement des compétences pré-citées.

Les seules dimensions illustrées sur la figure ci-dessus, suffisent à déterminer la géométrie de la rampe. Il est de votre ressort de positionner correctement les autres frontières en respectant cependant l'un des deux cas énumérés ci-dessous :

- paroi haute suffisamment éloignée pour ne pas interagir avec le choc de compression,
- paroi haute suffisamment proche pour interagir avec le choc de compression.

Conditions aux limites à considérer :

- *Free Stream* pour l'entrée afin de pouvoir spécifier TOUTES les données exigées par la théorie des caractéristiques (composantes en vitesse, Mach, pression, température),
- *Pressure outlet* pour la sortie,
- *Wall* pour la rampe,
- *Symmetry* pour la frontière supérieure.

Déroulement de la séance :

1. Générer une CAO (2D) pour l'éloignement vertical max. de la frontière sup.
2. Faire un calcul avec une taille d'éléments constante pour le maillage jusqu'à obtenir une première convergence avec le meilleur ordre de précision possible.
3. Adaptez le maillage en prenant pour critère le gradient de pression. Vous visualiserez notamment :
 - (a) ce champ de gradient pour valider la pertinence de ce choix,
 - (b) un plan de coupe du maillage adapté.
4. Reprenez l'exercice avec une paroi supérieure suffisamment proche pour interagir avec le choc de compression : qu'observez-vous sur le réseau de chocs ?

1 Création de la CAO

La CAO sera réalisée directement depuis l'outil 3D-CAD et spécifiant les coordonnées des principaux points du contour et en tenant compte d'une distance d'éloignement adéquate des C.L des entrée/sortie. Ces dernières sont laissées à votre convenance.

Il n'est pas ici nécessaire de générer une zone de raffinement : c'est la procédure de raffinement automatique qui s'en chargera.

2 Génération du maillage 2D

La procédure est classique, elle est juste ici rappelée dans ses grandes lignes (ne pas hésiter à vous référer aux précédents tutoriels) :

- ▷ Creation de **New Geometry Part**,
- ▷ Créer et exécuter une opération **Badge for 2D Meshing**,
- ▷ Etape **Assign Parts to Regions** et bien vérifier que dans l'onglet **Regions**, les plans de symétrie n'apparaissent plus,
- ▷ Création du maillage avec l'opération **Automated Mesh (2D)**. Pour un premier maillage, choisir :
 - **Base Size** à 0.03 m,

— **Surface Growth Rate** à 1.01

Cette valeur garantit une taille la plus homogène possible. Elle devra cependant **OBLIGATOIREMENT** être forcée à 1.1-1.3 pour la procédure de raffinement qui elle, au contraire, est basée sur des variations rapides de tailles de mailles.

- ▷ Spécifier les types de CL : *Free Stream* pour l'entrée. Les autres C.L. sont classiques.
- ▷ Générer le maillage. . .

Ne passer à l'étape suivante qu'après avoir *checké* votre maillage et vérifié qu'il vous convenait.

3 Mise en données

L'écoulement est supposé :

- ▷ stationnaire,
- ▷ **non visqueux**¹,
- ▷ compressible avec un fluide *air* associé à la loi des gaz parfaits.

Lors de la sélection des modèles et en raison des effets de compressibilité, vous cochez les options **Coupled Flow** et non pas **Segregated Flow**.

Motif : pour ce type de calcul, les effets de compressibilité amplifient les couplages entre les variables en vitesse, pression et température. Le schéma est alors adapté en conséquence pour limiter le risque de divergence voire de ralentir fortement la convergence.

- ▷ Spécifier les valeurs des conditions aux limites : nombre de Mach, pression TOTALE et température statique,
- ▷ Fixer la valeur de référence de la pression à 0 Pa dans : **Continua > Physics 1 > Reference Values > Reference Pressure**.

Cette étape est importante car elle permet de raisonner en valeur absolue et non relative pour la pression, ce qui est fondamental pour en déduire les valeurs correctes de pression totale. . .

3.1 Création d'un *Plot* pour visualiser le champ de Mach

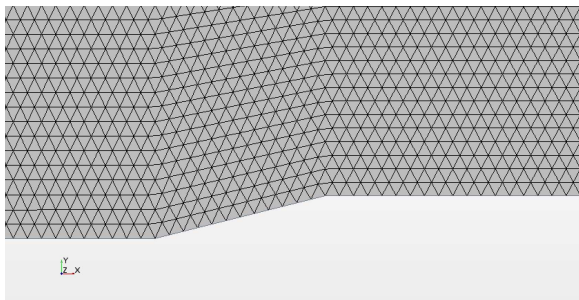
Procédure classique qui ne requiert pas d'être détaillée.

3.2 Initialisation et calcul

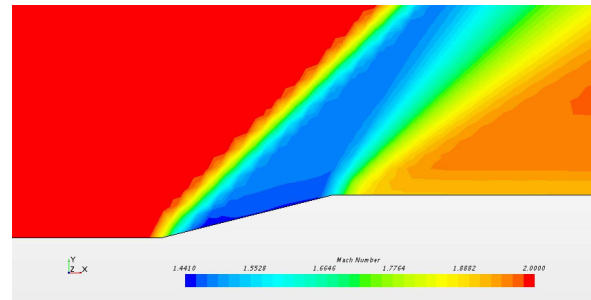
- ▷ Faire une première initialisation en imposant **une vitesse nulle sur tout le domaine**
- ▷ Lancer le calcul. Qu'observez-vous ?
- ▷ Faire une seconde initialisation en imposant cette fois-ci la vitesse U correspondant au nombre de Mach. Pour rappel :

$$\mathcal{M} = \frac{U}{c} \quad \text{avec pour la célérité} \quad c = \sqrt{\gamma r T} \quad \text{où} \quad r = 286 \text{ J/kg/K} \quad \text{et} \quad \gamma = 1.4.$$

- ▷ Visualisez l'écoulement se mettre en place au cours de la convergence.



(a) Maillage de base homogène



(b) Champ de Mach

- ▷ Extraire un profil axial (**XY Plot...**) du nombre de Mach à mi-hauteur du domaine.

1. Se traduit par *inviscid*.

- Visualisez les champs de température et de pression. Vérifiez que la pression statique en amont du choc est en accord avec la relation (voir cours) de choc :

$$\frac{p_t}{p} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \mathcal{M}^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

- Les résultats (nombre de Mach après le choc et angle de choc) sont-ils en accord avec la théorie ?

4 Procédure *manuelle* d'adaptation du maillage sur critère d'erreur

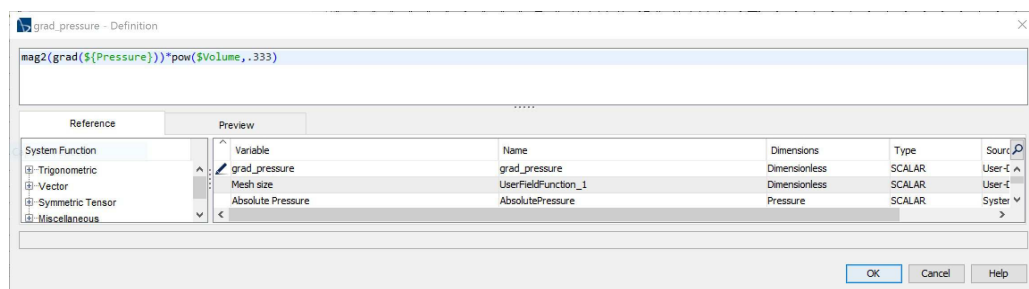
Le critère retenu pour raffiner/déraffiner le maillage est la norme du gradient de pression. Ce terme n'étant pas calculé par défaut, il est donc nécessaire d'avoir recours à une *Field Function* pour le calculer. Et donc l'occasion d'apprendre à le faire...

4.1 Création d'une Field Function pour le calcul du gradient de pression

- Clic-droit **Tools** > **Field Function** > **New** > **Scalar**
- Renommer la fonction nouvellement créée *gradpressure*
- Dans le menu du bas **Properties**, renseigner le champ **Definition** par la commande :

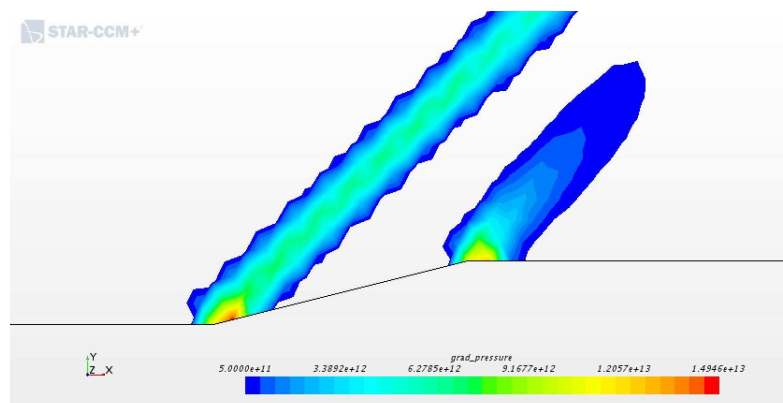
`mag2(grad($Pressure))*pow($Volume,.333)`

qui calcule une norme du gradient de pression pondérée par la surface de la cellule.



- Créer une *Scalar scene* pour visualiser le gradient de pression et décider de la valeur seuil de raffinement avec avoir "joué" sur la borne minimum du gradient de pression pour séparer les zones de forts gradient. A modifier dans :

Scenes > **Scalar Scene ...** > **Scalar 1** > **Scalar Field** onglet *Min* dans le menu **Properties** du bas.

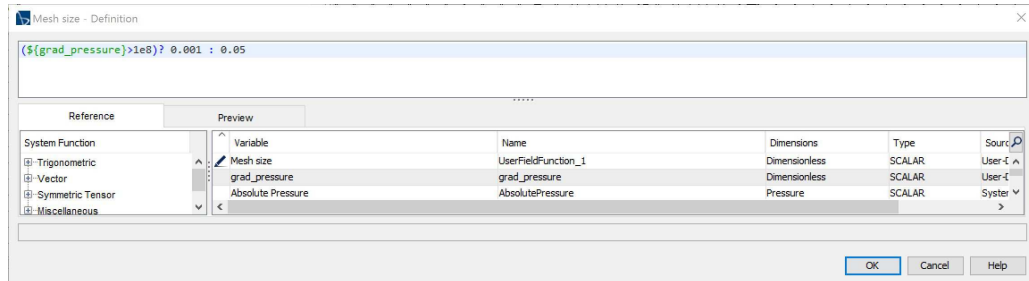


4.2 Création d'une Field Function pour une nouvelle carte de tailles de mailles

- Clic-droit **Tools** > **Field Function** > **New** > **Scalar**
- Renommer la fonction nouvellement créée *Mesh size*
- Dans le menu du bas **Properties**, renseigner le champ **Definition** par la commande :

$(\$gradpressure > value) ? \text{taille_min} : \text{taille_Max}$

Remplacer *value* par 10^8 (seuil de séparation de ce qui est raffiné/déraffiné), *taille_min* par 0.001 (raffiner) et *taille_max* par 0.05 (déraffiner). Ces valeurs sont données à titre d'exemple, libre à vous de les modifier à votre convenance.

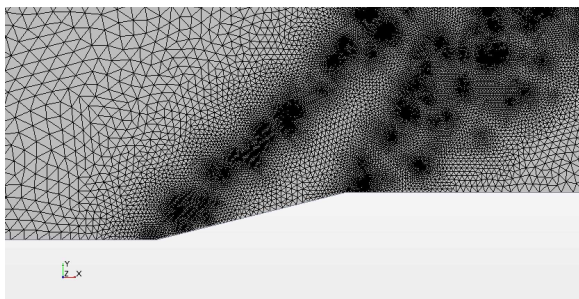


- ▷ Clic-droit **Tools** > **Tables** > **New Table** > **XYZ Internal Table** pour créer une nouvelle carte de tailles de mailles.
- ▷ La renommer *Mesh Refinement* et sélectionner dans **Scalar** la fonction *MeshSize* précédemment créée (double cliquer après avoir parcouru la liste et identifié *MeshSize*)
- ▷ Dans le menu *Parts* sélectionner le domaine *Fluid* (si vous l'avez nommé ainsi...) où appliquer ce raffinement.
- ▷ Clic-droit sur la table *Mesh Refinement* et **Extract**.

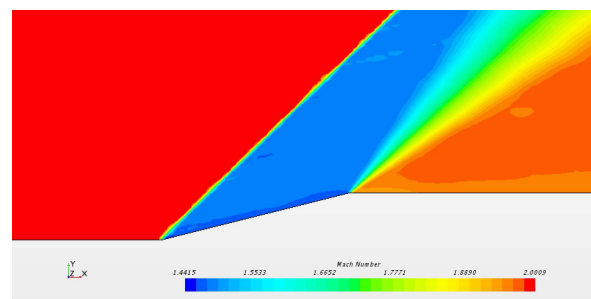
4.3 Remaillage avec prise en compte de la nouvelle carte de maille

On dispose désormais d'une nouvelle carte pour la taille des mailles sur tout le domaine. La dernière étape consiste alors à configurer le mailleur en fonction de cette dernière et non plus en fonction des paramètres classiques *Base Size*...

- ▷ Aller dans **Operations** > **Automated Mesh (2D)** > **Mesher** > **Triangular Mesher** (ou autre). Dans le menu **Properties** du bas niveau **Expert** spécifier dans *Field Function Refinement Table*, la fonction *Mesh Refinement*.
- ▷ Dans les paramètres du mailleur, modifier le paramètre **Surface Growth Rate** à 1.1-1.3
Cette valeur impose un taux de variation de taille important entre deux mailles consécutives, ce qui est justement le but recherché avec la procédure de raffinement.
- ▷ Relancer le maillage, puis le calcul.
- ▷ Itérer si nécessaire (juste à mettre la jour la Table de carte des mailles puis remailler).



(c) Maillage raffiné



(d) Champ de Mach

Fiche synthétique 1

Raffiner un maillage à partir d'une nouvelle carte de mailles :

1. Définir une *Field Function* (gradpressure) pour calculer le gradient de pression :
`mag(grad($Pressure))*pow($Volume,.333)`
2. Définir une *Field Function* pour calculer la nouvelle carte de taille (MeshSize) :
`($gradpressure>value)? taille_min : taille_Max`
On décide ici de raffiner à `taille_min` et de relâcher à `taille_max` si le gradient est supérieur à `value`.
3. Définir une *XYZ Internal table* (MeshRefinement) et sélectionner la Fonction "MeshSize" dans Scalar et tout le domaine. Puis clic-droit dessus et Extract.
4. Aller dans Mesh > Models et sélectionner le mailleur (2D ou 3D). Dans :
 - *Field Function Refinement Table* si l'option de maillage choisie est **Automated Mesh (2D)**,
 - *Mesh Size Table* sinon (maillage 3D par exemple),sélectionner "MeshRefinement".
5. Relancer le maillage, puis le calcul.
6. Itérer si nécessaire (juste à mettre la jour la Table de carte des mailles puis remailler).

Ce que vous aurez appris à l'issue de cette session *T24*

- à mettre en place un modèle CFD adapté aux effets de compressibilité,
- à proposer une méthodologie visant à raffiner le maillage pour une meilleure capture du choc,
- à gérer les interactions entre choc et les conditions aux limites sur des frontières éloignées.