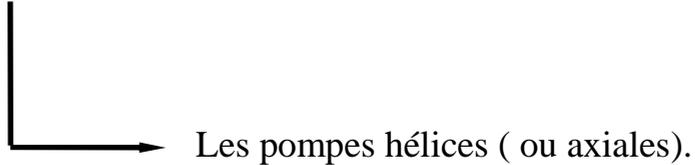


INTRODUCTION ET POSITION DU PROBLEME

INTRODUCTION:

- Différents types de pompes.



UTILISATIONS:

- Aéronautique.

- Hydraulique.

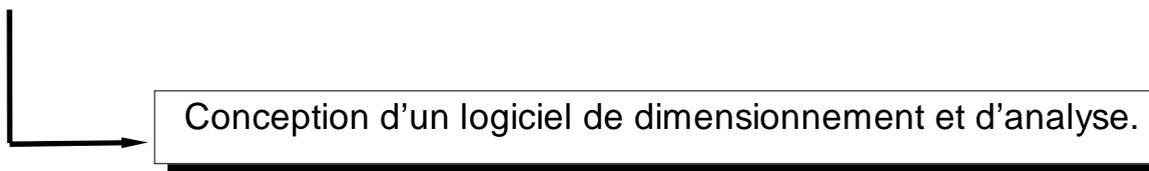
MOTIVATION:

- Disponibilité des résultats d'essais du NACA (série 65 -10%).

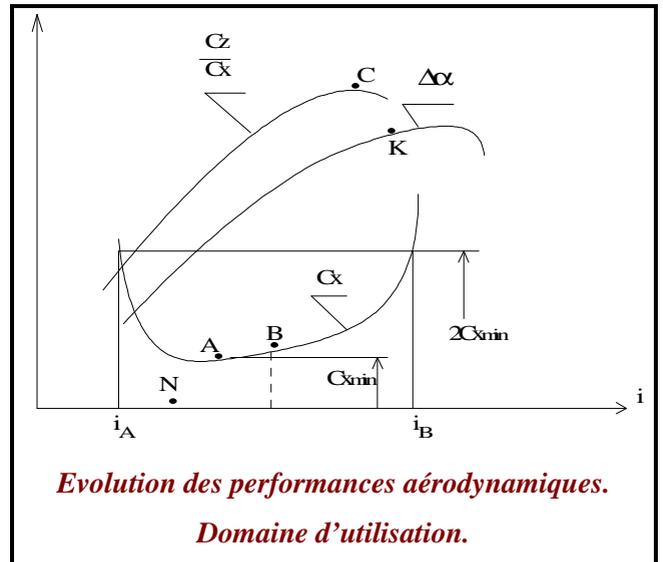
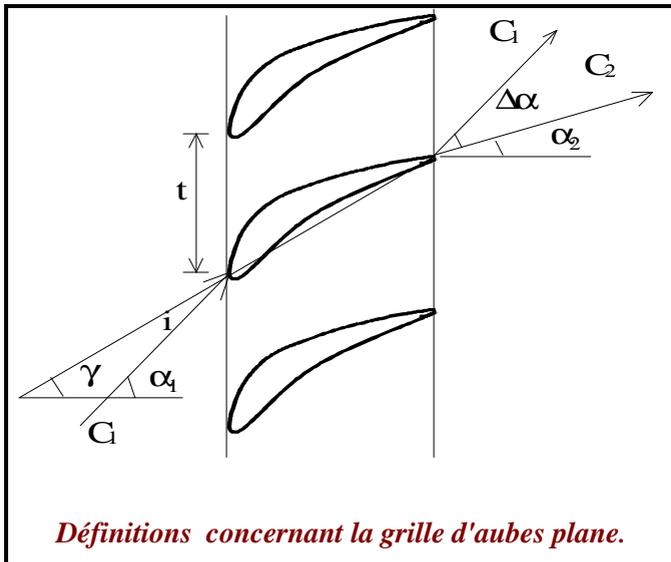
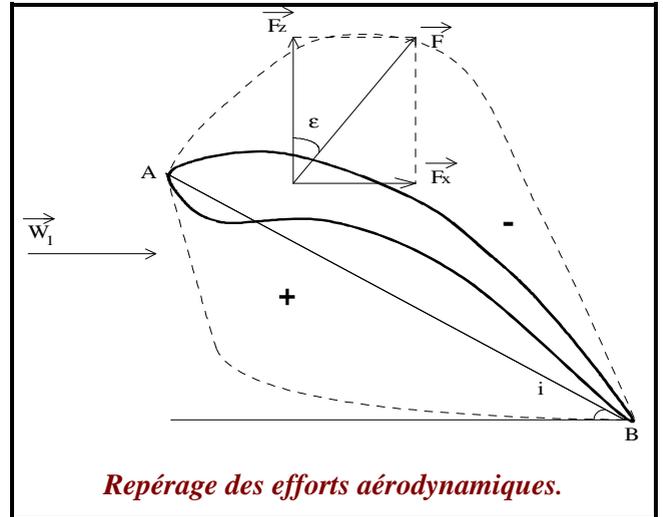
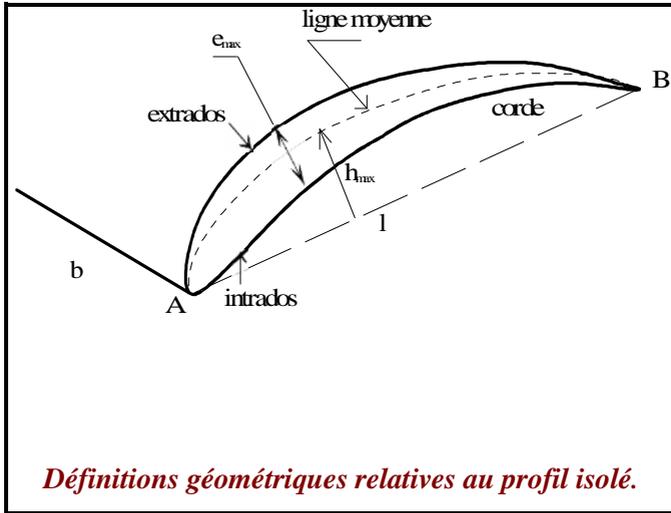
- Répondre d'une façon globale et rapide aux problèmes direct et inverse.

BUT:

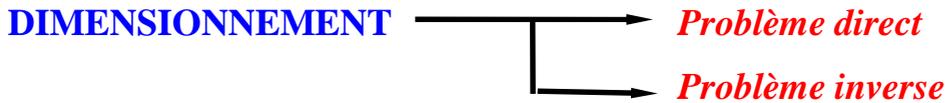
- Combiner les résultats du NACA à la théorie des grilles d'aubes.



DEFINITIONS



PROPRIETES CINEMATiques DES GRILLES D'AUBES



RELATION DE RUDEN (LOI EN TANGENTE)

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = (1 - B) (a \operatorname{tg} \gamma + b) + B \operatorname{tg} \alpha_1$$

$$B(\sigma) = 1 - \operatorname{Exp}\left(\frac{-c}{\sigma^d}\right) \quad c = 0.18 \quad \text{et} \quad d = 1.30$$

FONCTIONNEMENT NOMINAL D'UNE GRILLE

$$i_0 = -2,535 + P(\sigma) (C_{Z\infty 0} + 0,823)$$

$$P(\sigma) = 15,535 - 21,647 e^{-0.4242 \sigma}$$

$$\Delta \alpha_0 = -0,94 + q(\alpha_1) (i_0 - 2,07)$$

$$q(\alpha_1) = 2,103 - 4,019 \cdot 10^{-7} (\alpha_1)^{3.382}$$

EVALUATION DES PERTES DE PROFIL

Angle de perte ε $\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{C_x}{C_z}$

Coefficient de traînée C_x $C_x = C_d \left[\frac{\operatorname{Cos} \alpha_m}{\operatorname{Cos} \alpha_1} \right]^2 \quad C_d = C_{d0} + C_{dc}$

$$C_{d0} = 0.003733 C_{Z\infty 0} + 0.01093$$

$$C_{dc} = K (i - i_0)^n$$

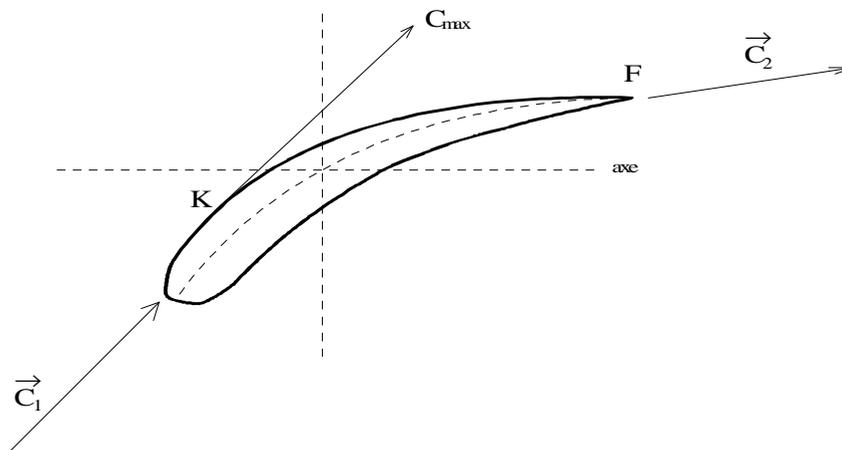
Coefficient de portance C_z $C_z = 2 \frac{\operatorname{Cos} \varepsilon}{\sigma} \frac{\operatorname{Cos}^2 \alpha_m}{\operatorname{Cos}(\alpha_m - \varepsilon)} (\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2)$

PROPRIETES CINEMATQUES DES GRILLES D'AUBES

LIMITES D'UTILISATIONS

$0.5 \leq \sigma \leq 1.5$	$30^\circ \leq \alpha_1 \leq 70^\circ$	$0 \leq C_{z\infty 0} \leq 2.7$
$Re_1 \geq 250000$		$M_1 \leq 0.6$

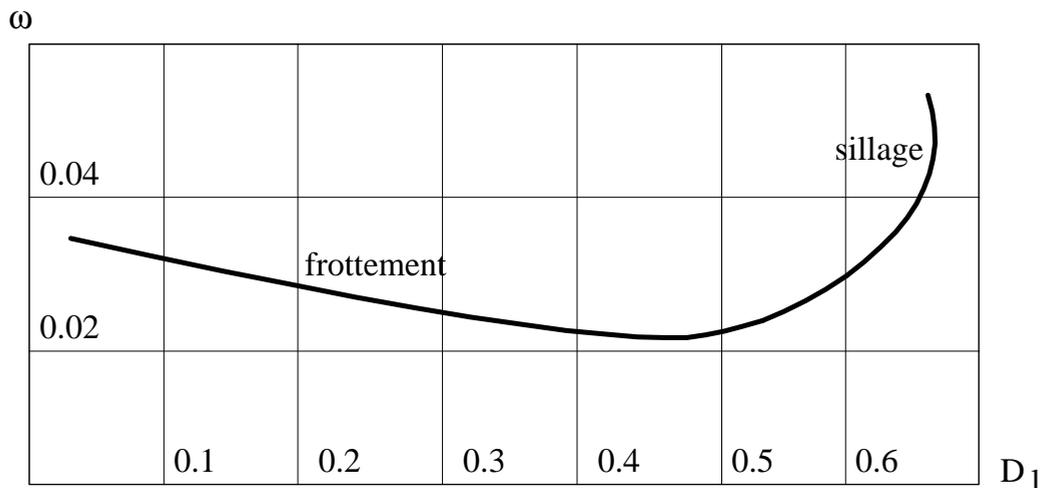
FACTEUR DE DIFFUSION



Localisation de la vitesse maximale.

Facteur de diffusion global:

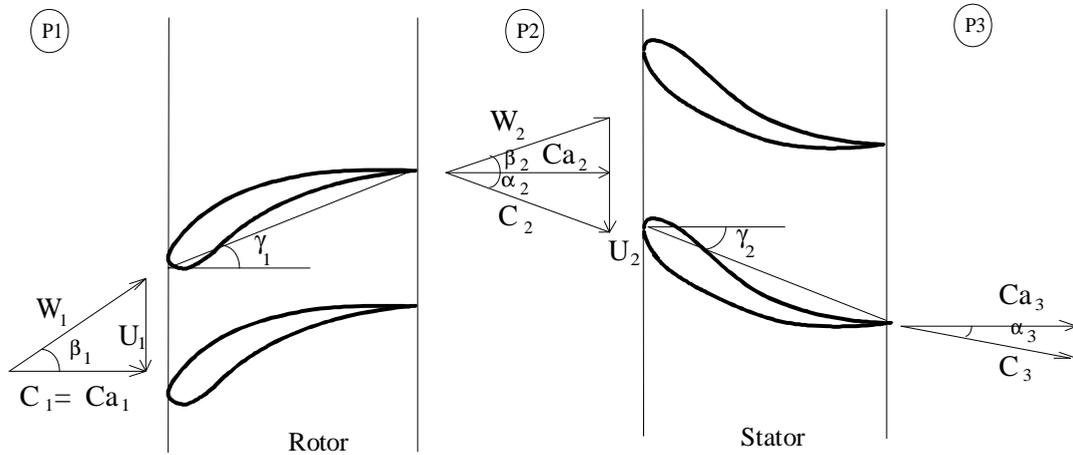
$$D = 1 - \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} + \frac{\cos \alpha_1}{2\sigma} (\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2)$$



Evolution des pertes totales avec le facteur de diffusion.

ETUDE D'UN ETAGE DE COMPRESSION

GRILLES PLANES



Configuration générale de l'étage.

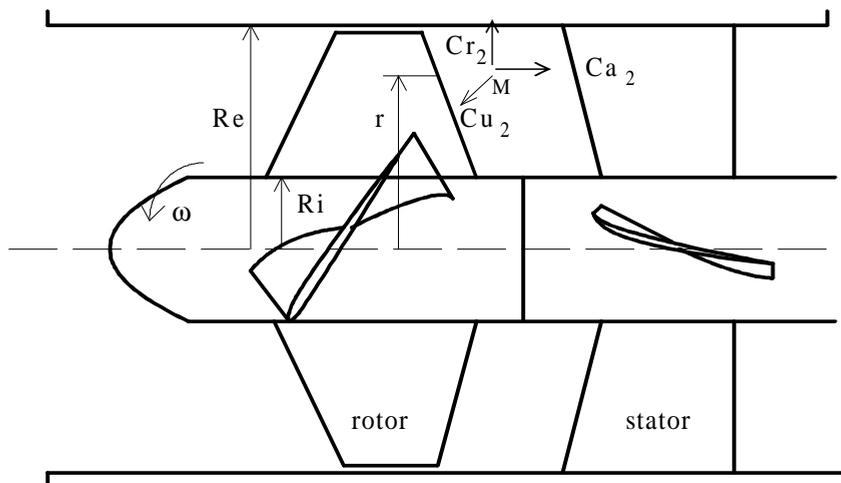
Hauteur locale de l'étage:

$$H = \frac{Ca_2^2}{g} \operatorname{tg} \alpha_2 \left[\operatorname{tg} (\beta_m - \varepsilon_1) + \operatorname{tg} (\alpha_m - \varepsilon_2) \right]$$

Rendement local:

$$\eta_H = \frac{H}{H_E} = \frac{\operatorname{tg} (\beta_m - \varepsilon_1) + \operatorname{tg} (\alpha_m - \varepsilon_2)}{\operatorname{tg} \beta_m + \operatorname{tg} \alpha_m}$$

GRILLES ANNULAIRES



Directions principales de l'écoulement.

ETUDE D'UN ETAGE DE COMPRESSION

Equilibre radial dans les machines axiales

$$Cu(r) = K_1 r + K_2 + \frac{K_3}{r}$$



$$Ca_2(r) = \sqrt{f(r) + C}$$

$$f(r) = 2K_1(\omega - K_1)r^2 - 2(K_2^2 + 2K_1K_3)\ln r + 2K_2(\omega - 3K_1)r + \frac{2K_2K_3}{r}$$

Différents types de loi génératrice

Vortex libre: $K_1 = K_2 = 0$ $Cu_2 = \frac{K_3}{r}$

$$Cr = 0 \quad \text{si} \quad Ca_2 = Ca_3 = Cte$$

$$H = \frac{U_2 Cu_2}{g} = \frac{\omega r K_3}{g r} = \frac{\omega K_3}{g}$$

Vortex forcé: $K_2 = K_3 = 0$ $Cu_2 = K_1 r$

$$Cr = 0 \quad \text{si} \quad Ca_2 = \sqrt{2K_1(\omega - K_1)r^2 + Cte} \quad Ca_3 = \sqrt{2\omega K_1 r^2 + Cte}$$

$$H = \frac{U_2 Cu_2}{g} = \frac{\omega r K_1 r}{g} = \frac{\omega K_1 r^2}{g}$$

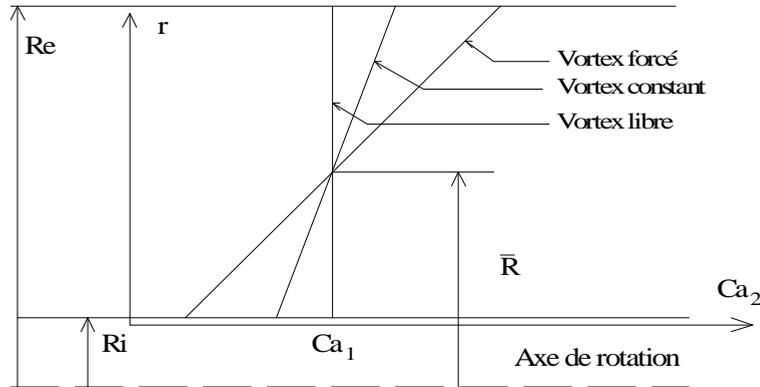
Vortex constant: $K_1 = K_3 = 0$ $Cu_2 = K_2$

$$Cr = 0 \quad \text{si} \quad Ca_2 = \sqrt{-2K_2^2 \ln r + 2K_2 \omega r + Cte} \quad Ca_3 = Cte$$

$$H = \frac{U_2 Cu_2}{g} = \frac{\omega K_2 r}{g}$$

ETUDE D'UN ETAGE DE COMPRESSION

Définition du rayon moyen, de la hauteur réelle et du rendement global de la grille:



Evolution radiale de la vitesse axiale entre le rotor et le stator.

$$\bar{R} = \frac{R_e + R_i}{2}$$

Notations:

$$\alpha_2(\bar{R}) = \bar{\alpha}_2 \quad , \quad \beta_m(\bar{R}) = \bar{\beta}_m \quad , \quad \alpha_m(\bar{R}) = \bar{\alpha}_m \quad , \quad Ca_2(\bar{R}) = \bar{Ca}_2$$

- La hauteur réelle H délivrée par l'étage est:

$$H = \bar{H} - \Delta h$$

$$\bar{H} = H(\bar{R}) = \frac{Ca_1 \bar{Ca}_2}{g} \operatorname{tg} \bar{\alpha}_2 \left[\operatorname{tg}(\bar{\beta}_m - \varepsilon_1) + \operatorname{tg}(\bar{\alpha}_m - \varepsilon_2) \right]$$

$$\Delta h = f \frac{8 R_e}{2(R_e - R_i)} \frac{Ca_1^2}{2g} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{R_{en} \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon_p}{3,71 d_H} \right)$$

- Le rendement hydraulique global est donc défini par:

$$\eta_{Hgl} = \frac{H}{H_E} = \frac{\bar{H} - \Delta h}{H_E} = \bar{\eta}_H - \frac{\Delta h}{H_E}$$

$$\bar{\eta}_H = \frac{\operatorname{tg}(\bar{\beta}_m - \varepsilon_1) + \operatorname{tg}(\bar{\alpha}_m - \varepsilon_2)}{\operatorname{tg} \bar{\beta}_m + \operatorname{tg} \bar{\alpha}_m}$$

RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES

GEOMETRIQUES ET HYDRAULIQUES

DIMENSIONNEMENT GLOBAL

$$\Omega = \frac{\omega \sqrt{q_v}}{(gH)^{3/4}}$$

$$\Lambda = \frac{R_e (gH)^{1/4}}{\sqrt{q_v}}$$

$$T = \frac{\text{Rayon interieur}}{\text{Rayon exterieur}} = \frac{R_i}{R_e}$$

Première relation fonctionnelle:

$$T = \frac{c - \Omega^2}{c + \Omega^2}$$

$$c = \frac{4\pi (\overline{\overline{\beta}}_m + \overline{\overline{\alpha}}_m)^2}{K^{3/2}}$$

Deuxième relation fonctionnelle:

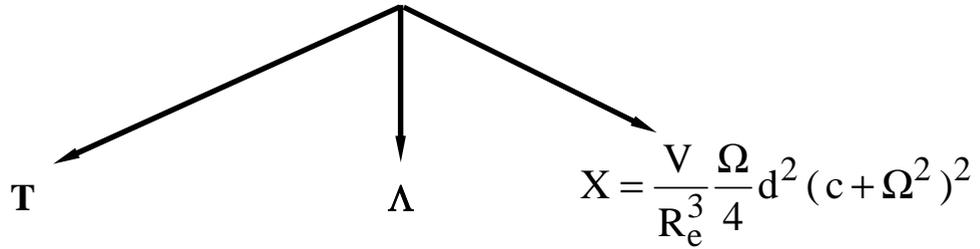
$$\Lambda = \frac{d}{2\Omega} (c + \Omega^2)$$

$$d = \frac{K^{1/4}}{\sqrt{\pi c}}$$

DIFFERENTS CRITERES D'OPTIMISATION

Critères d'optimisation \longrightarrow couple $(\bar{\alpha}_m, \bar{\beta}_m)$.

Paramètres géométriques

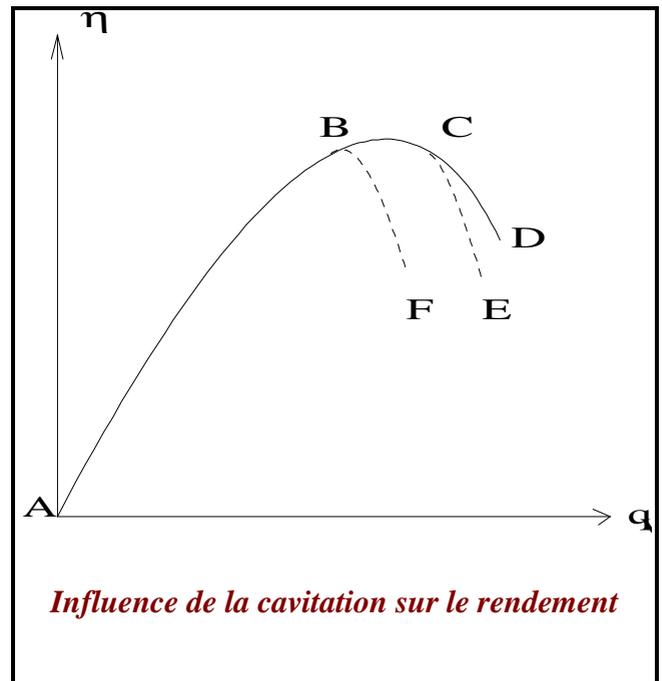
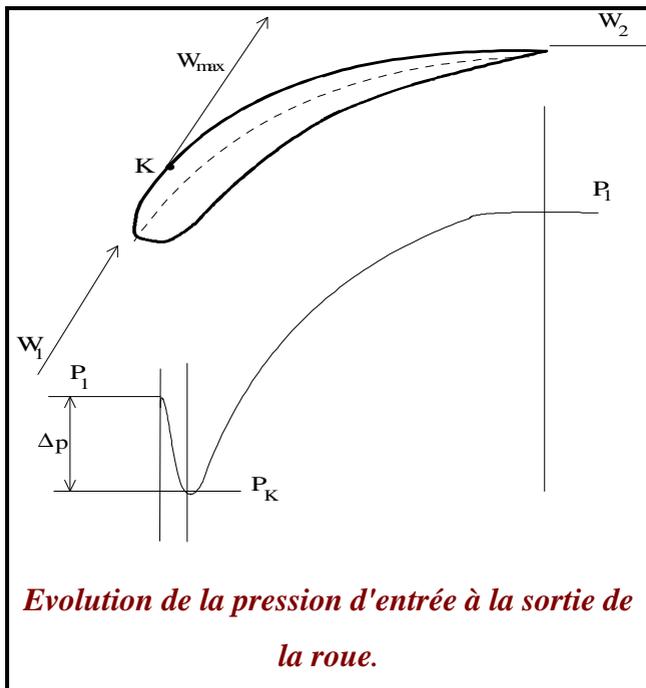


Bruit hydraulique:

↓

Puissance acoustique \longrightarrow
$$P_{a1} = \frac{\rho \Omega^2}{\pi Z_1^2 C_o^3} q_v (g H)^{5/2} \frac{\text{tg } \bar{\alpha}_m \text{ tg}^2 \bar{\beta}_m}{\text{tg } \bar{\alpha}_m + \text{tg } \bar{\beta}_m}$$

Capacité d'aspiration:



DIFFERENTS CRITERES D'OPTIMISATION

NPSH requis:

$$\text{NPSH}_r = \frac{C_1^2}{2g} + \left[\frac{W_2^2}{2g(1-DI)^2} - \frac{W_1^2}{2g} \right]_{r=\text{Re}}$$

$$\lambda_d = \left[\frac{\cos\beta_1}{\cos\beta_2} \frac{1}{(1-DI)} \right]_{r=\text{Re}}^2 - 1$$

Paramètre de THOMAS

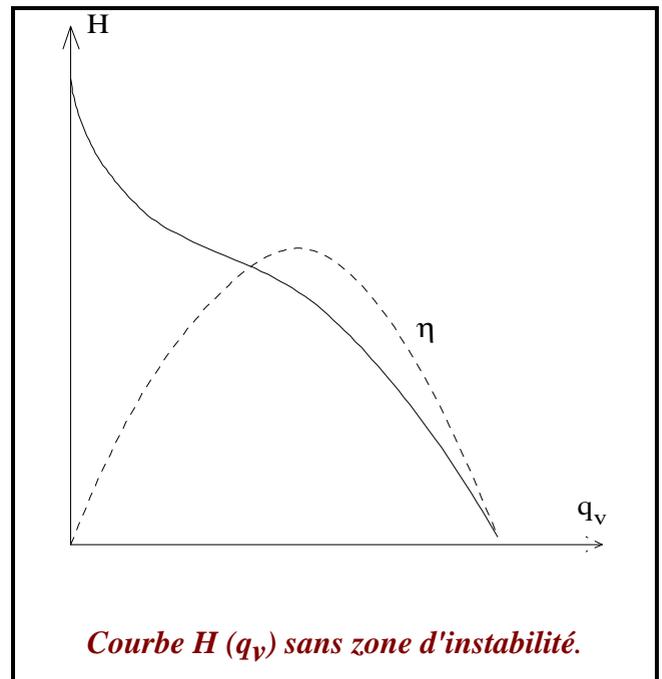
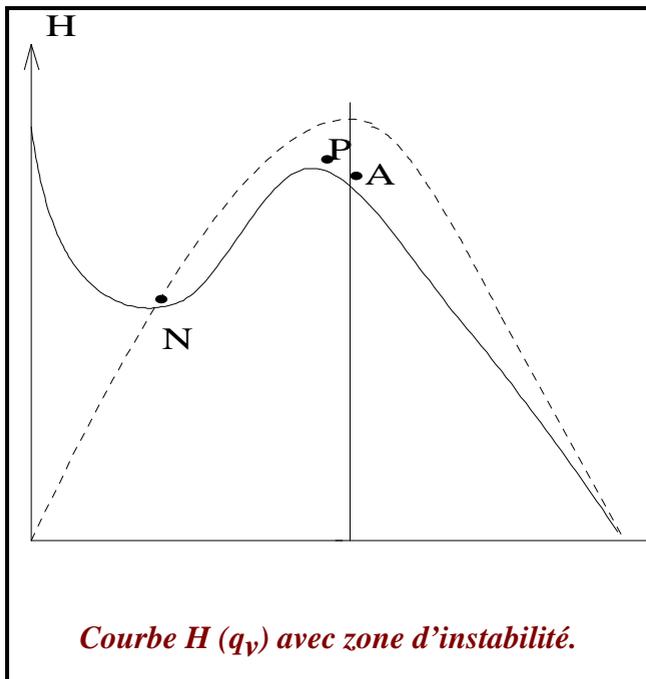
$$\sigma^{**} = \frac{\text{NPSH}_r}{H}$$

NPSH au col:

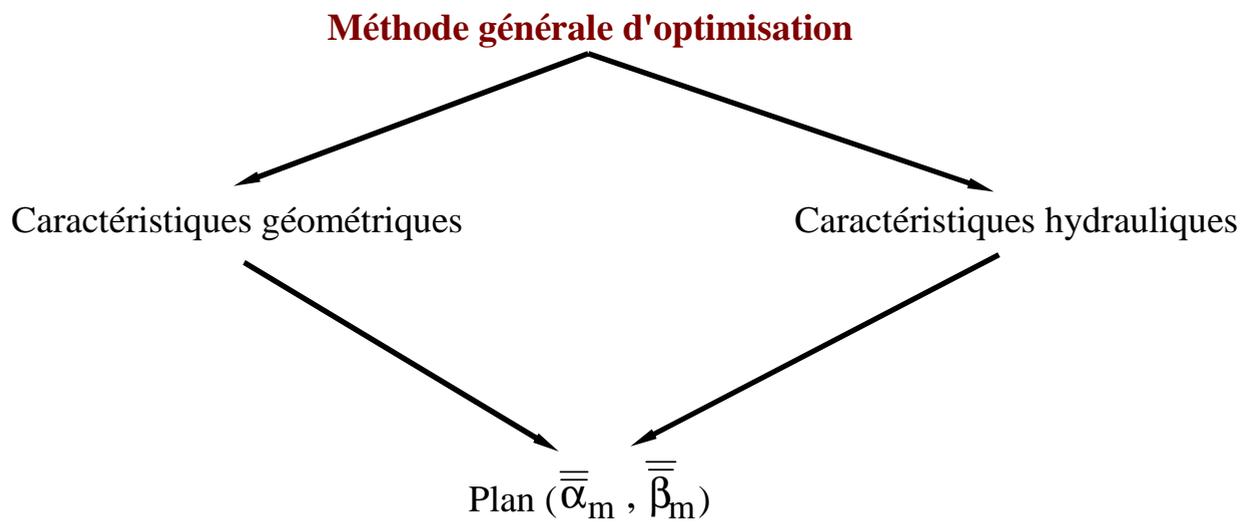
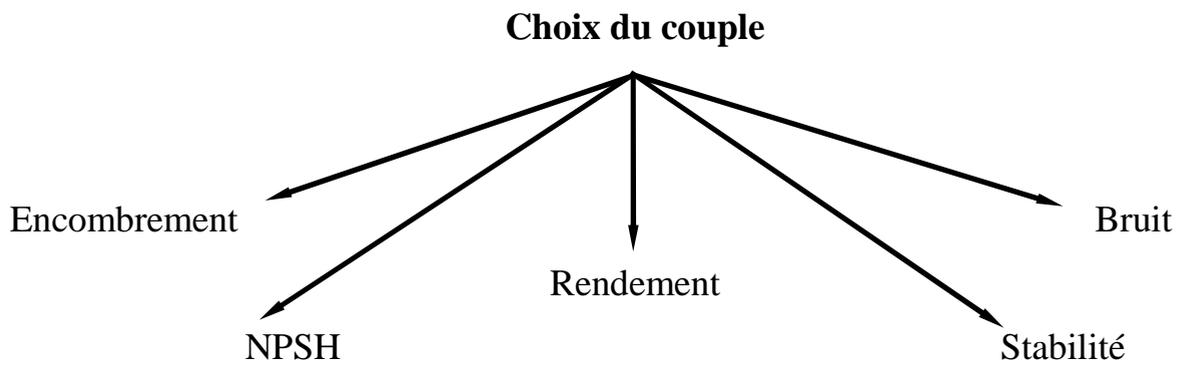
$$\text{NPSH}_c = \frac{\lambda_d W_c^2 + Ca^2}{2g}$$

$$\lambda_d = 1 - 0,9 \text{Exp} \left[-\frac{210,7}{W_c^{2,78}} \right]$$

Problème de stabilité:

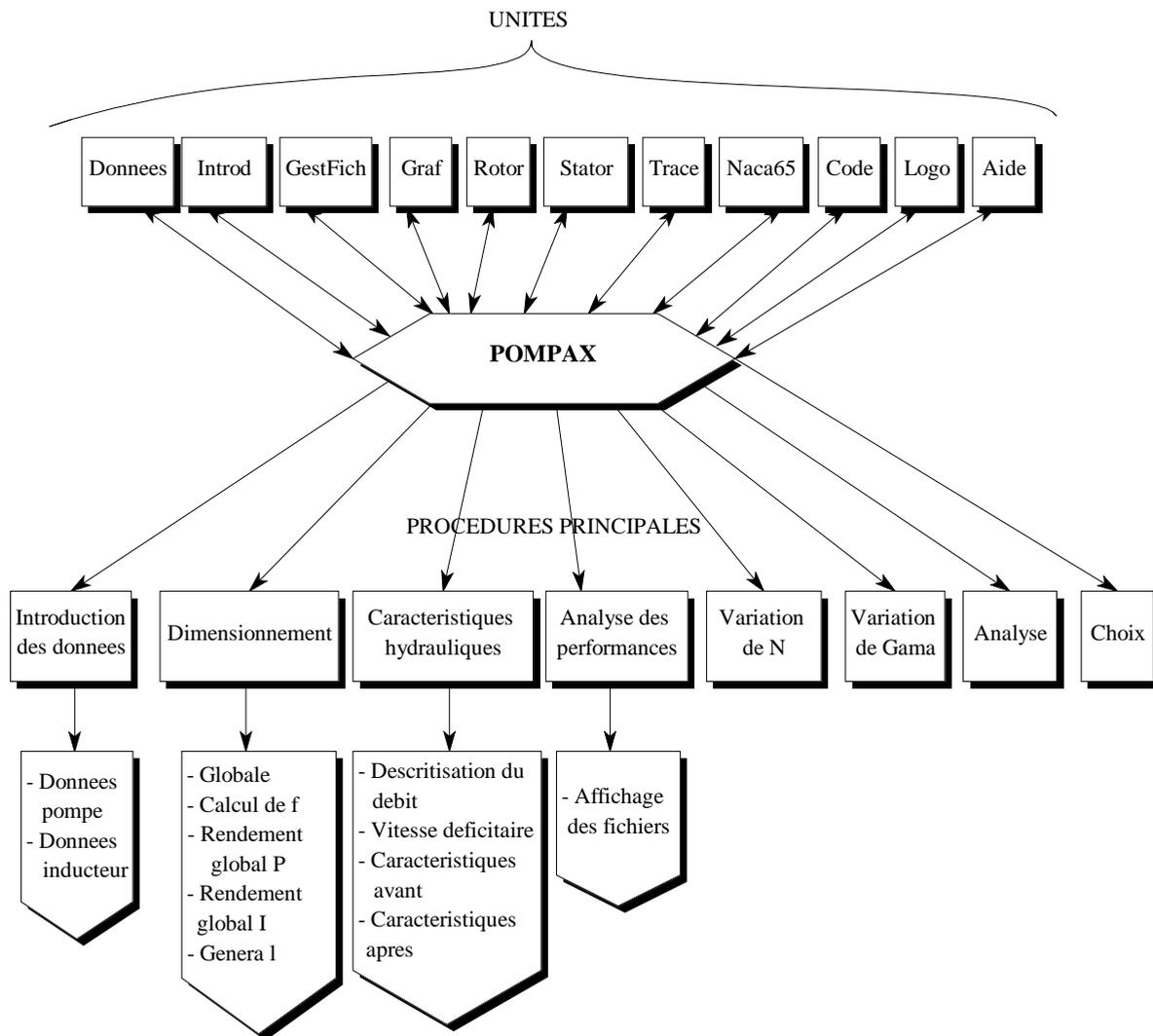


CHOIX OPTIMAL DU COUPLE ($\bar{\alpha}_m, \bar{\beta}_m$)



PRESENTATION DU LOGICIEL « POMPAX »

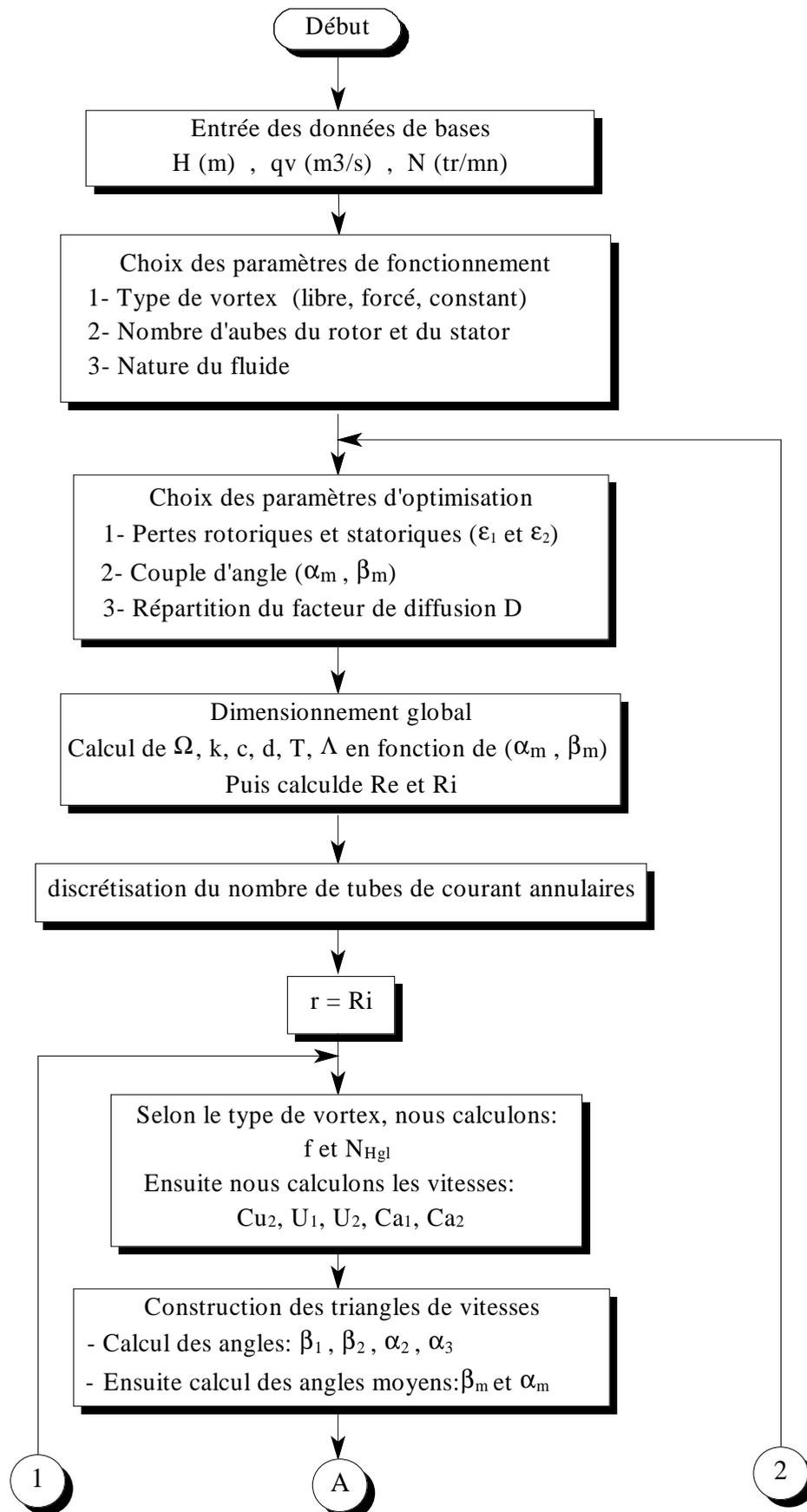
POMPAX → Turbo Pascal → Plus de 6600 lignes
 → Modulaire → Insertion ou modification.

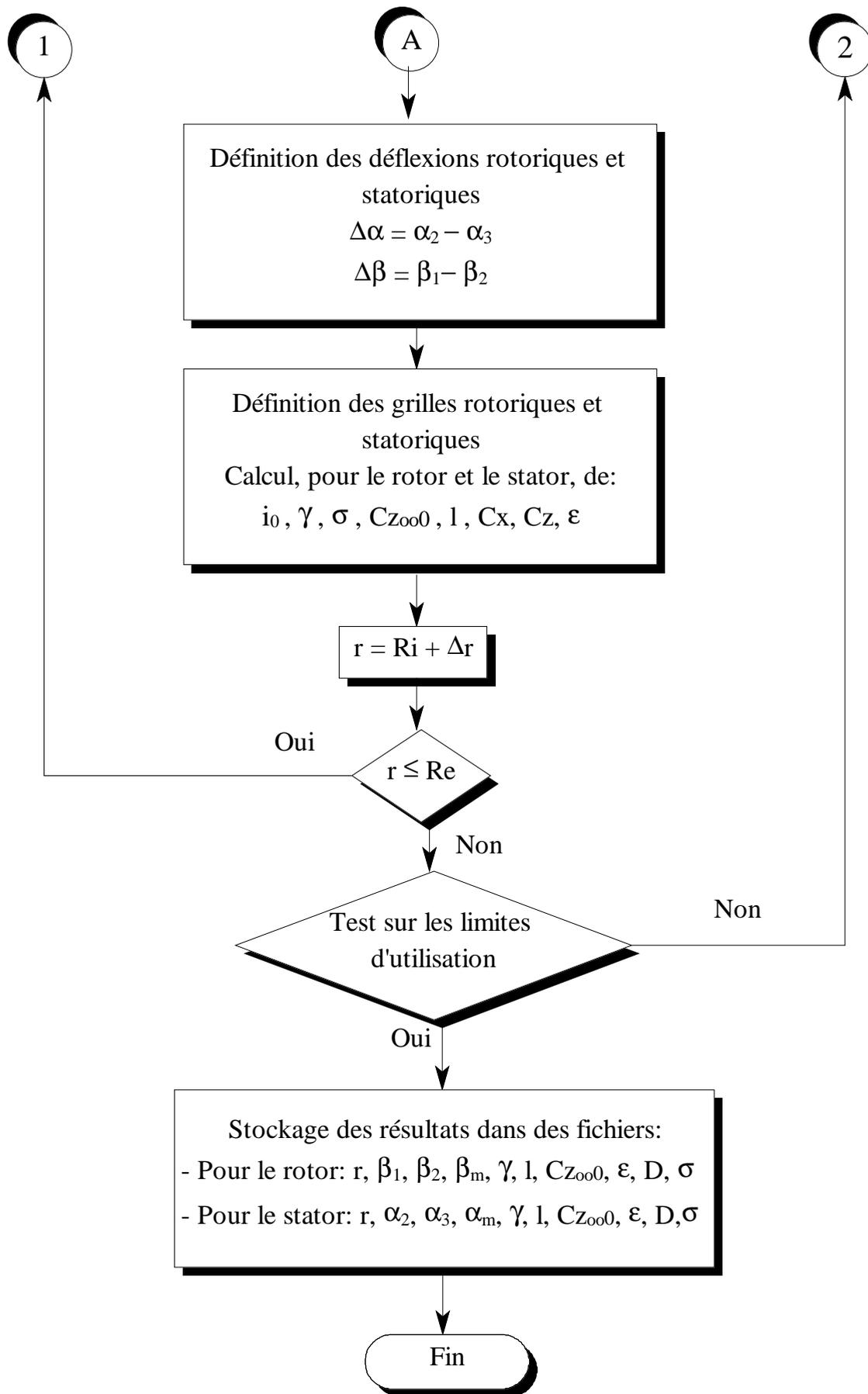


Organigramme des unités et procédures du logiciel POMPAX

PRESENTATION DU LOGICIEL « POMPAX »

Organigramme du dimensionnement global (problème inverse).





VITESSE DÉFICITAIRE

- *Région pariétale* → Loi de paroi.

- *Région centrale*: → Loi déficitaire.

$$U_f = \bar{C}_a \sqrt{\frac{C_f}{2}} = \bar{C}_a \sqrt{\frac{f}{8}}$$

$$C_f = \frac{f}{4}$$

$$U^+ = \frac{Ca}{U_f}$$

$$y^+ = \frac{y U_f}{\nu}$$

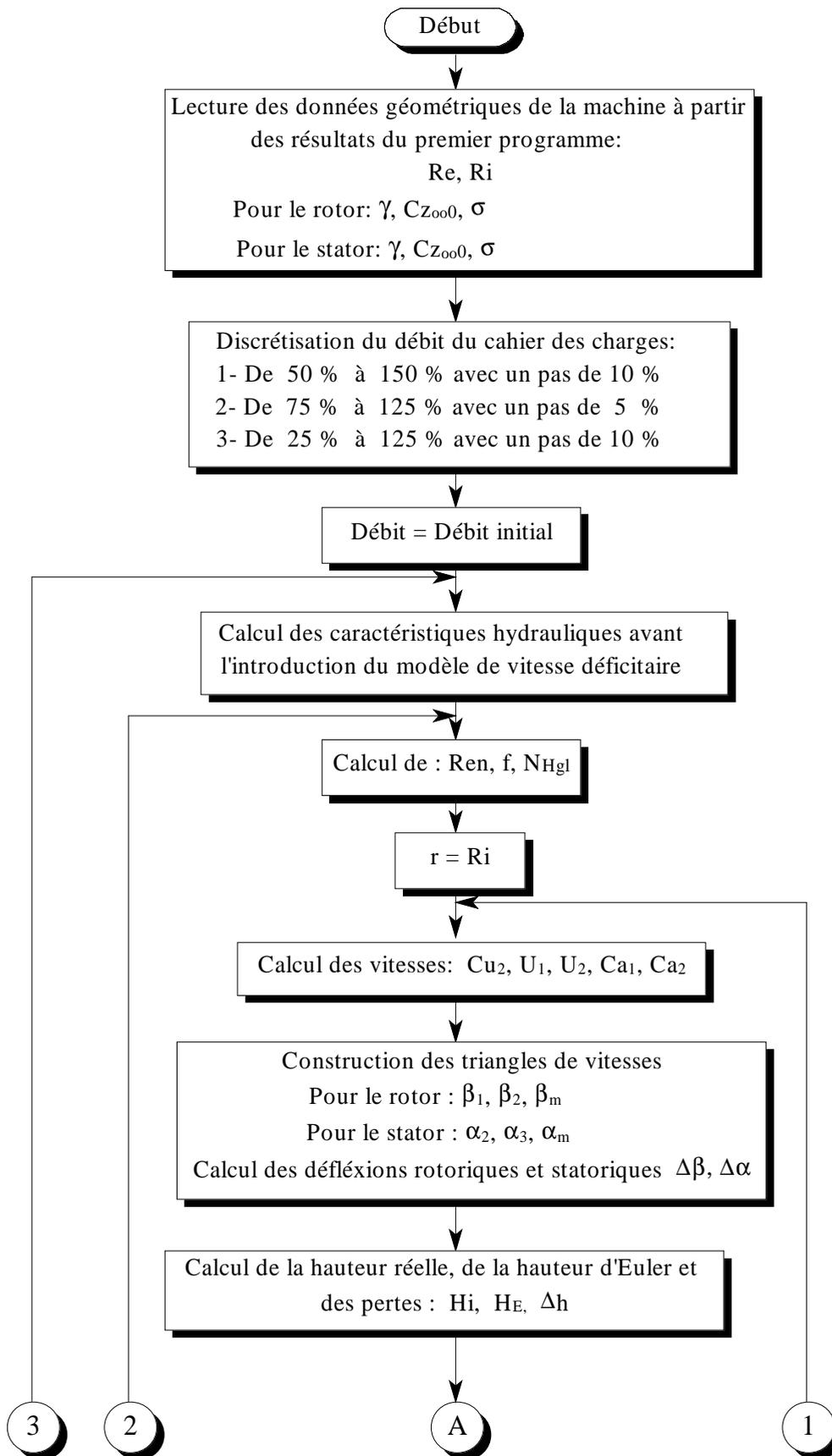
- **Zone laminaire :** $0 < y^+ < 5$ $U^+ = y^+$

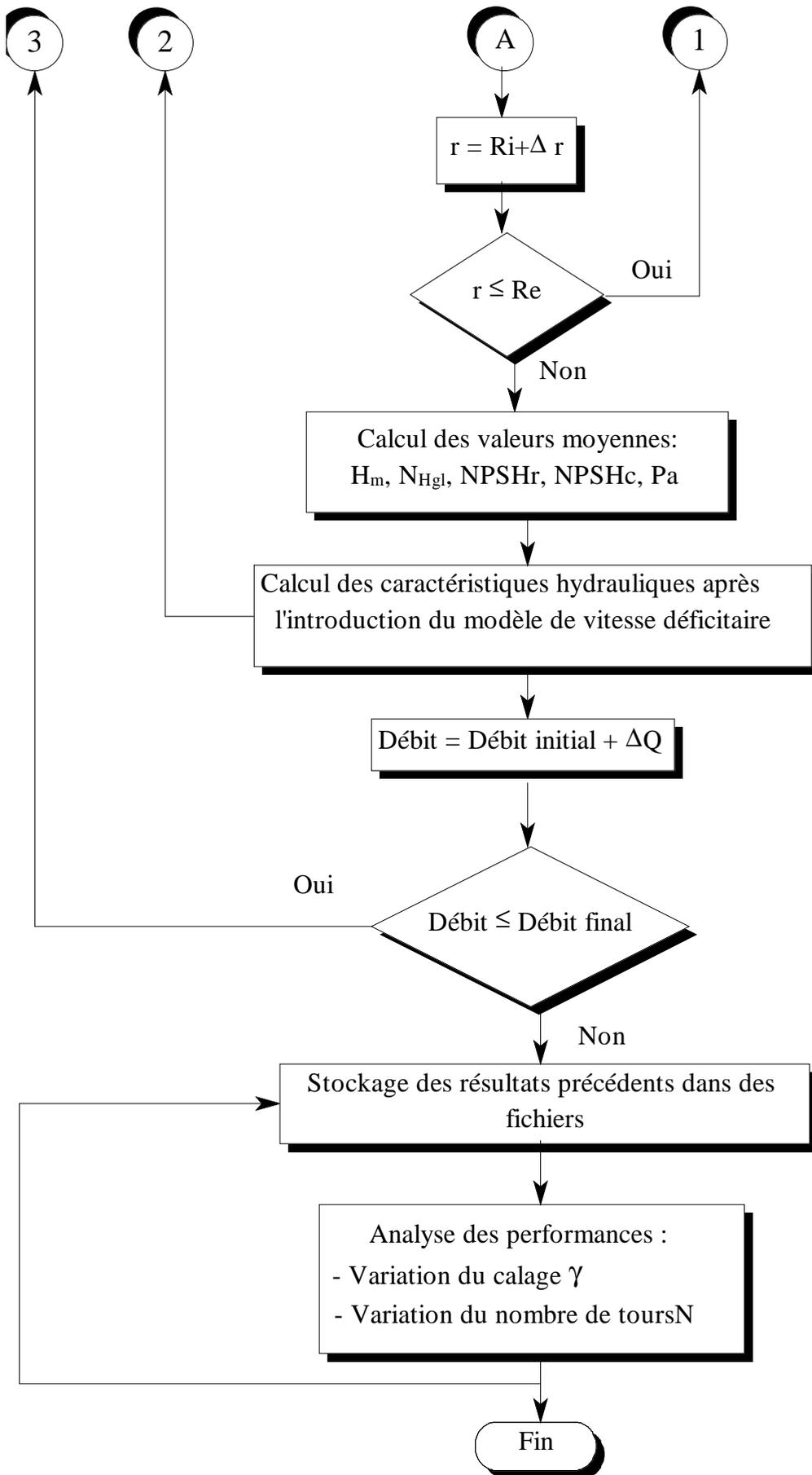
- **Zone transitoire :** $5 < y^+ < 30$. $U^+ = 5 + 5 \ln\left(\frac{y^+}{5}\right)$

- **Zone turbulente :** $y^+ > 30$. $U^+ = 8.74(y^+)^{1/8}$

PRESENTATION DU LOGICIEL « POMPAX »

Organigramme de prédiction et d'analyse des performances (problème direct).





VALIDATION

Validation théorique

(Pompe de référence)

Validation expérimentale

Présentation des données de bases des pompes:

Pompes	H (m)	q _v (l/s)	N (tr/mn)	$\bar{\alpha}_m$ (°)	$\bar{\beta}_m$ (°)	DRe
N1	3.139	201.17	1000	14	50.38	0.24
N2	1.809	88	1000	18.6	71.43	0.166
N3	3.019	189.76	1000	14	52	0.24
N6	2.002	102.49	1450	21	69.5	0.18
N7	2.350	130.35	1450	19	64	0.22

Remarques

Mauvais positionnement du tube de pitot.

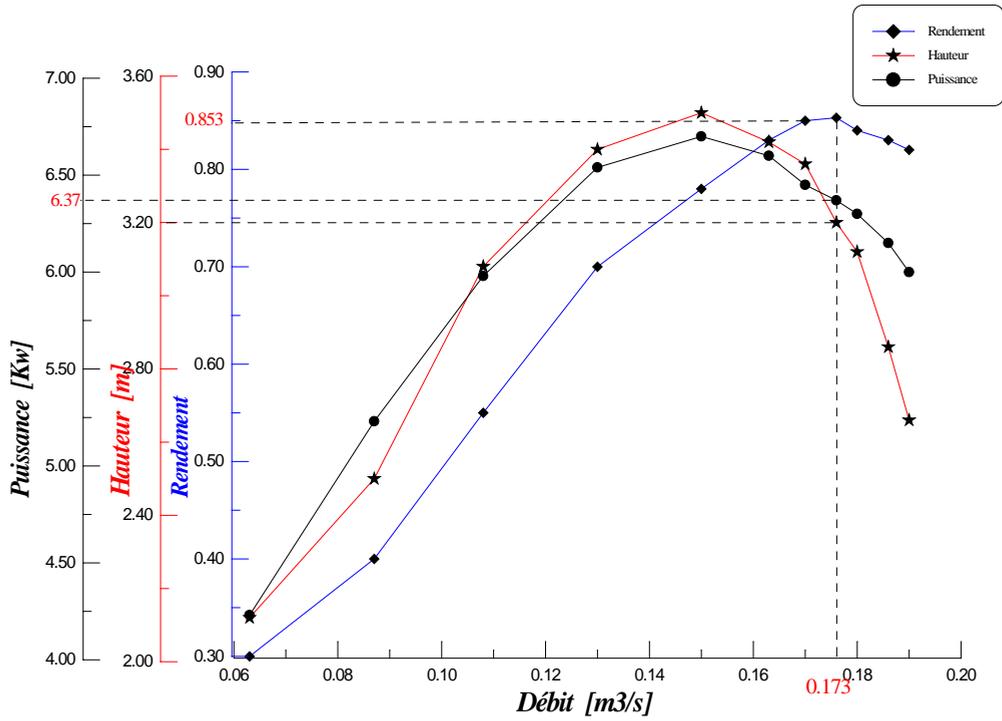
Lecture des valeurs sur les manomètres.

Vitesse de rotation.

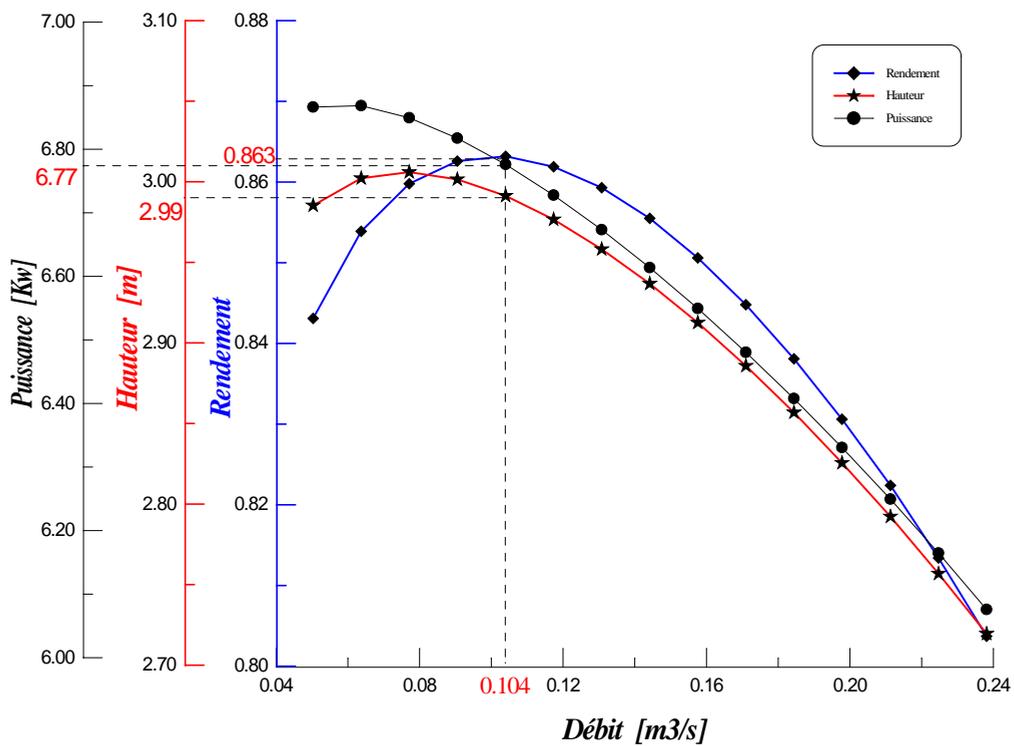
Réduction du moyeu des pompes N6 et N7

Calage de la pompe N1

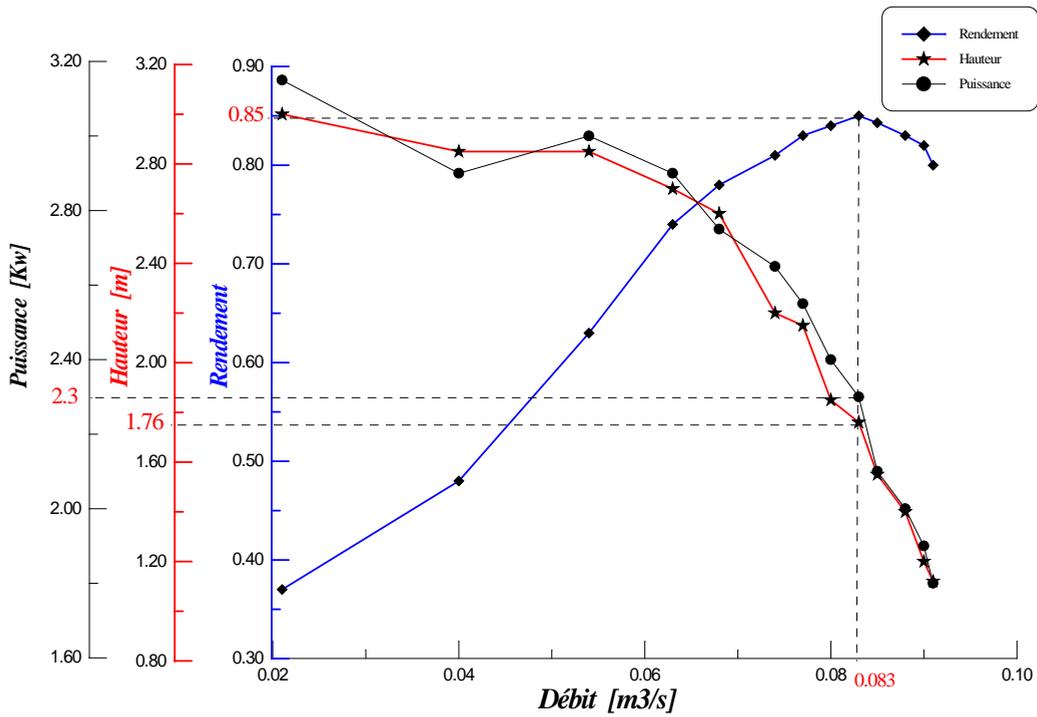
Présentation des résultats (problème d'échelle).



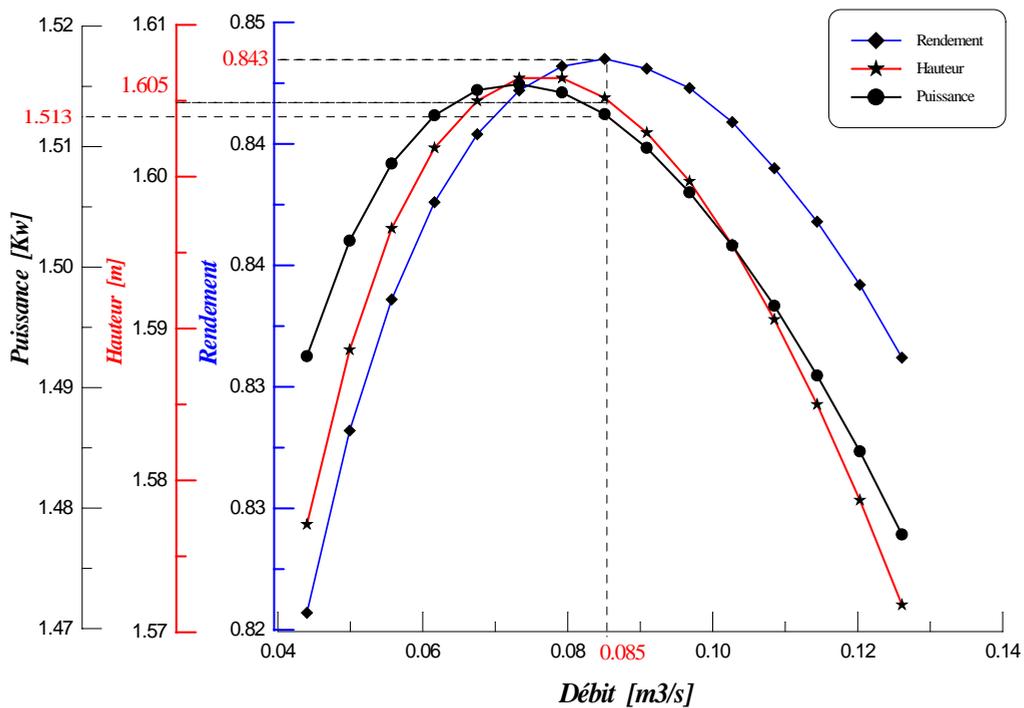
Courbes caractéristiques expérimentales de la pompe N1.



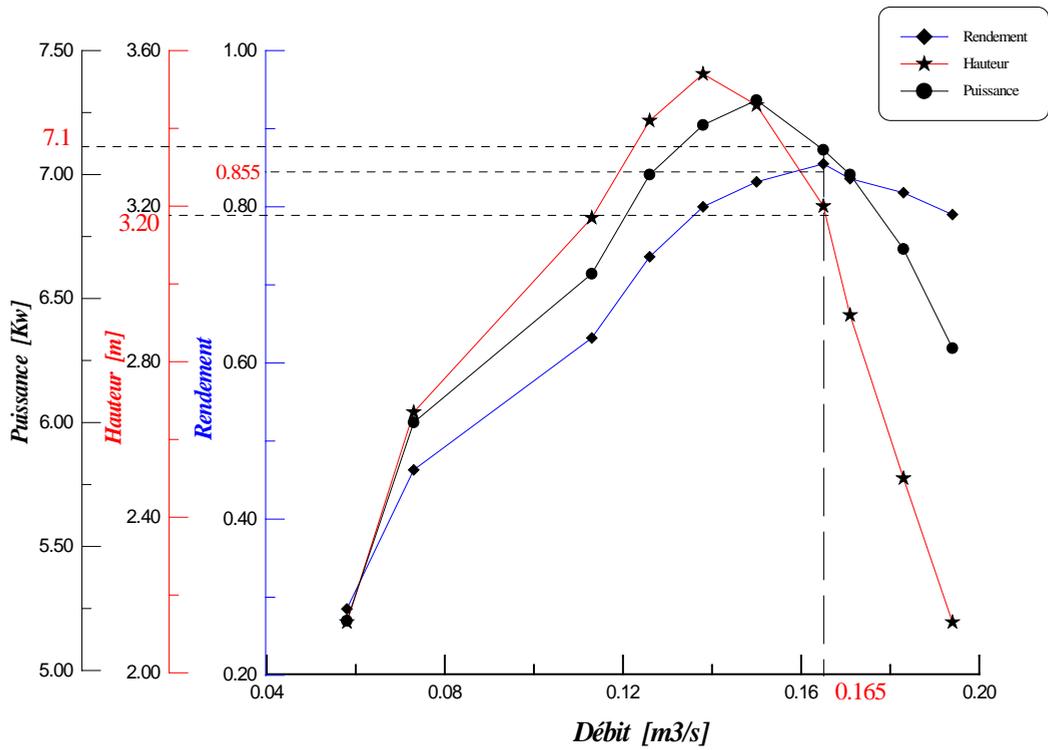
Courbes caractéristiques théoriques de la pompe N1.



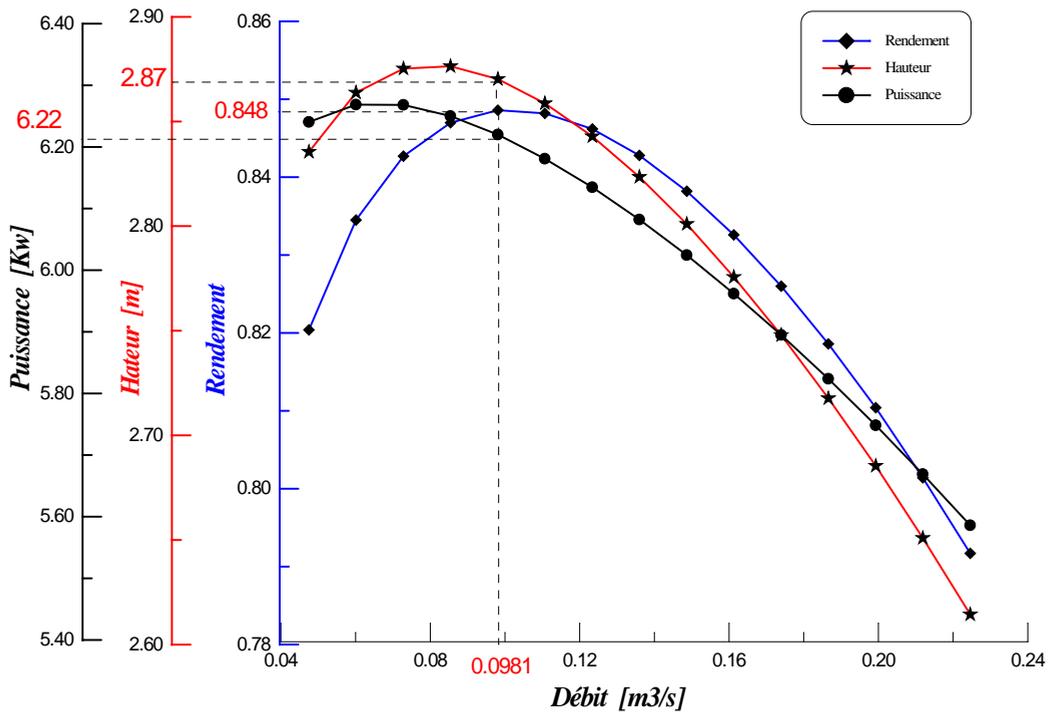
Courbes caractéristiques expérimentales de la pompe N2.



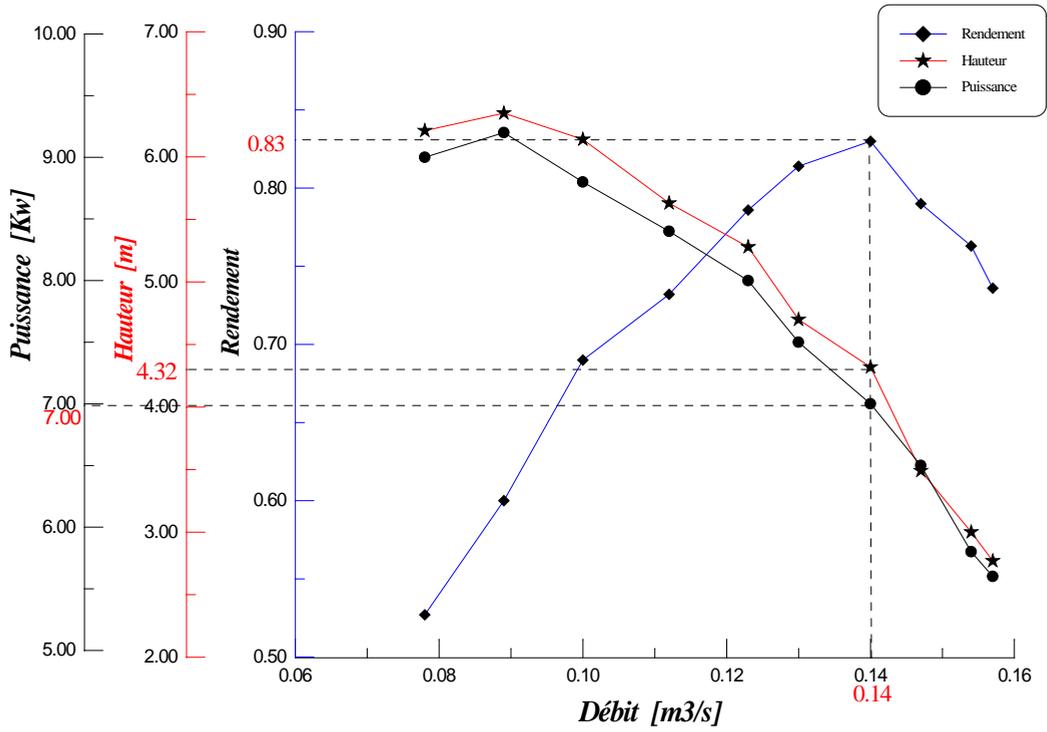
Courbes caractéristiques théoriques de la pompe N2.



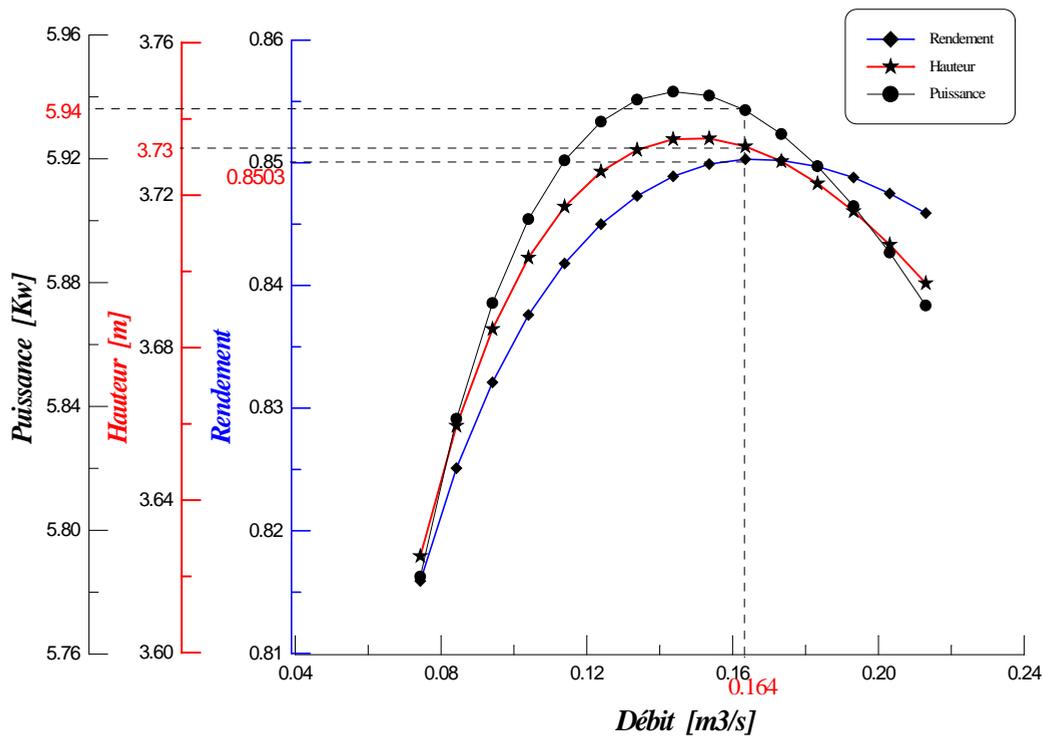
Courbes caractéristiques expérimentales de la pompe N3.



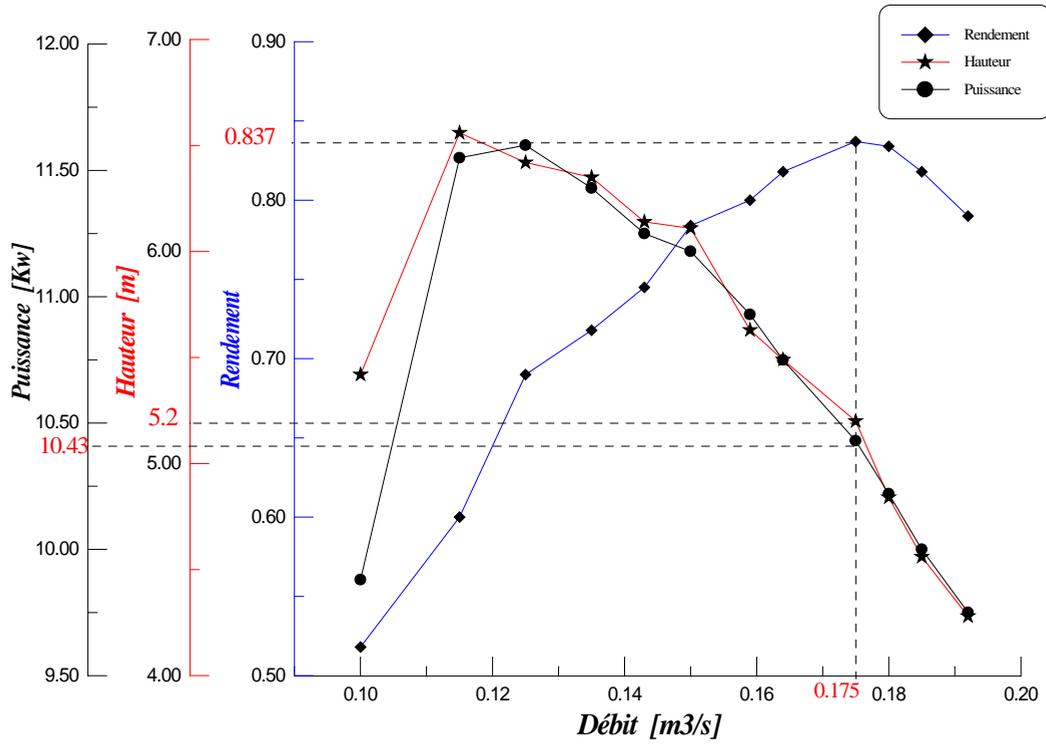
Courbes caractéristiques théoriques de la pompe N3.



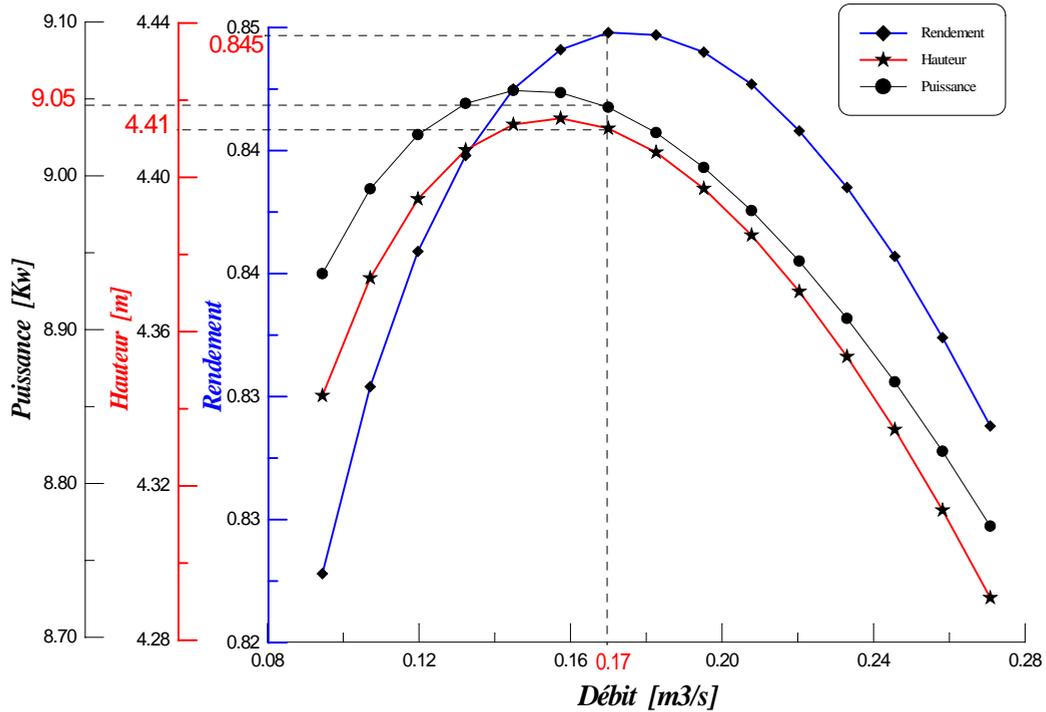
Courbes caractéristiques expérimentales de la pompe N6.



Courbes caractéristiques théoriques de la pompe N6.



Courbes caractéristiques expérimentales de la pompe N7.



Courbes caractéristiques théoriques de la pompe N7.

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Générale:

- Allure.
- Rendements.
- Hauteurs.
- Puissances.
- Débits.

Pompes	Valeurs théoriques « POMPAX »				Valeurs expérimentales			
	Débit	Rend.	Hauteu r	Puissance	Débit	Rend.	Hauteur	Puissance
N1	0.104	0.863	2.99	6.77	0.173	0.853	3.20	6.37
N2	0.085	0.843	1.605	1.513	0.083	0.85	1.76	2.3
N3	0.098	0.848	2.87	6.22	0.165	0.855	3.20	7.1
N6	0.164	0.85	3.73	5.94	0.14	0.83	4.32	7.00
N7	0.170	0.845	4.41	9.05	0.175	0.837	5.2	10.43

- Cavitation:

Pompes	NPSH calculé « POMPAX »	NPSH mesuré	Facteur de diffusion au rayon extérieur
N1	3.39	3.36	0.24
N2	1.286	1.96	0.166
N3	3.28	3.53	0.24
N6	2.89	2.36	0.18
N7	2.128	-	0.22

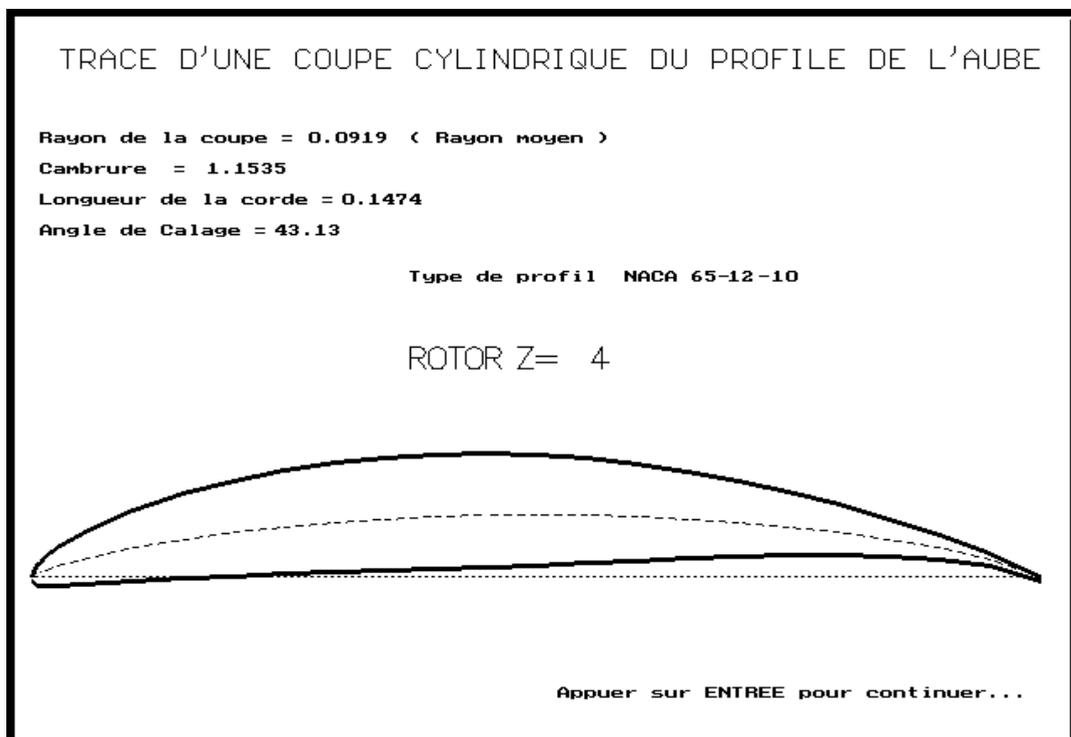
- *Stabilité:* \longrightarrow N2 \longrightarrow N6 et N7 \longrightarrow N1 et N3

DIMENSIONNEMENT D'UN VENTILATEUR

Caractéristiques géométriques → bons résultats

Caractéristiques hydrauliques → moins bons.

Caractéristiques géométriques	Données de POMPAX »	Données expérimentales
Vitesse spécifique	3.128	2.965
Rayon spécifique	0.658	0.686
Rayon extérieur (m)	0.1186	0.1187
Rayon intérieur (m)	0.0685	0.0685
Type de profil au rayon moyen du rotor	NACA 65-12-10	NACA 65-12-10
Corde au rayon moyen du rotor (m)	0.147	0.111
Type de profil au rayon moyen du stator	NACA 65-21-10	NACA 65-21-10
Corde au rayon moyen du stator (m)	0.190	0.162



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- But → Pleinement atteint.
- Résultats → Satisfaisants au voisinage du point nominal.
- Corrections → Machines dimensionnées par **POMPAX**
- Ventilateurs → Applicable avec moins de précision.

