

PGE - GIE2 - UEF ENGA

Energétique (Avancé) – Turbomachines et Moteurs à combustion interne

Florent Ravelet¹

Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et des Systèmes Energétiques

¹Arts et Métiers - Sciences et Technologies

13 février 2023



LIFSE



Sommaire

1. Organisation de l'UE

- Syllabus national
- Organisation en modules
- Programme des modules
- Evaluation

2. Notions générales sur les turbomachines

- Définitions et classification
- Rôle d'une turbomachine, rappels d'hydraulique
- Exemple adaptation pompe/circuit





Organisation de l'UEF ENGA



Code UE - intitulé	Titre UE - thématique (AVANCE)		
Directeur du programme	Xavier.Zufrenco@amsam.eu Directeur de la formation initiale		
Année d'étude	Cycle	Type	Langue d'étude
Niveau MS	5A PSE - Programme Grande École Arts et Métiers ParisTech	UEF	Français
ECTS	Campus	Durée d'étudiant planifiée	Semestre
3	Tous les campus Arts et Métiers	60h	GE2
Mots-clés	Turbinomachines, Moteurs à combustion interne, cycles thermodynamiques		

Objectifs de formation visés (cf. référentiel CDIO : <http://www.cdio.org/>)

Groupes d'objectifs	Objectifs de formation	Objectifs principalement visés par l'UE
Connaissances disciplinaires et raisonnement	L.1 Connaissance des sciences de base	X
	L.2 Connaissance des principes fondamentaux d'ingénierie	X
	L.3 Connaissances, méthodes et outils avancés en ingénierie	X
Capacités et compétences personnelles et professionnelles	2.1 Raisonnement analytique et résolution de problèmes	X
	2.2 Méthodes scientifiques : expérimentation, questionnement et validation	X
	2.3 Pensée systémique	
	2.4 Savoir être et savoir apprendre	
Compétences interpersonnelles : Travail d'équipe et communication	2.5 Éthique, diversité et responsabilité professionnelles	
	3.1 Travail d'équipe	
	3.2 Communication	
Créer, concevoir, mettre en œuvre, exploiter, innover et entreprendre dans un contexte de Responsabilité Sociétale des Entreprises	3.3 Communication en langues étrangères	
	4.1 Contexte interne, société et environnemental	
	4.2 Contexte de l'entreprise et des affaires	
	4.3 Créer de l' valeur au sein d'affaires	
	4.4 Conception	
	4.5 Mise en œuvre	
	4.6 Exploitation	
	4.7 Innovation	
4.8 Entrepreneurat en ingénierie		

Piliers de formation

Génie Mécanique	Génie Énergétique	Génie Industriel	Management
	X		



Prérequis spécifiques

Connaissances acquises en UE1 GE1 ENG, formation Arts et Métiers grandes écoles.

Acquis d'apprentissage visés

À l'issue de l'UE, l'étudiant sera capable de :

- Comprendre, modéliser et analyser le fonctionnement d'un système énergétique fluide et de ses composants

En particulier :

- Calculer des bilans d'énergie sur les différents organes et sur un système énergétique dans son ensemble. Tracer les cycles thermodynamiques associés dans une perspective d'analyse de l'efficacité énergétique (pertes de chaleur fatale et d'énergie)
- Classer les différents types de turbomachines selon le sens du transfert d'énergie (machine réceptrice ou génératrice d'énergie mécanique), selon leur géométrie (machine radiale, mixte ou axiale) et selon le régime d'écoulement (compressible ou incompressible)
- Utiliser la théorie des similitudes dans le cadre des turbomachines
- Proposer le dimensionnement à partir de l'analyse du cahier des charges d'un composant d'un système énergétique, en tenant en compte une démarche de résolution itérative
- Prendre en compte une problématique de cavitation dans un circuit hydraulique
- Analyser et décrire le fonctionnement d'un moteur à combustion interne

Description de l'UE

- Turbinomachines :

- o Fonctions des éléments constitutifs des machines (rotor, stator)
- o Types de machines (radiales, mixtes, axiales)
- o Triangle des vitesses et théorie de l'écouler des turbomachines
- o Similitude des turbomachines (coefficients de Busemann)
- o Phénomène de cavitation : origine et conséquences
- o Calcul du Net Positive Suction Head requis et disponible
- o Variables d'arrêt isentropique, application au gaz parfait polytropique, nombre de Mach, ordres de choc
- o Cycles thermodynamiques associés, calcul des rendements

- Moteurs à combustion interne :

- o Principe de fonctionnement d'un moteur à combustion interne
- o Cycles thermodynamiques des moteurs
- o Mécanisme de la combustion et la pollution
- o Efficacité et récupération d'énergie sur gaz d'échappement

Ressources bibliographiques

- RIVOLDI Michel. Machines à fluides, Principes et fonctionnement. Collection Technosup. Ellipses, 2010
- FRANCK Jean-Pierre. La cavitation : mécanismes physiques et aspects industriels. PUG, 1995
- SAKURAIYAMA/TUDD H.L.H. Gas turbine theory. 3th ed. Pearson, 2008
- BERNARD Jacques. Turbinomachines à fluides compressibles : compresseurs, turbines à gaz et vapeur, turbomoteurs d'aérofrete. Ellipses, 2020
- LALLEMAND André. Thermomécanique des milieux fluides : application aux machines hydrauliques et thermiques. Ellipses, 2018
- MEUNIER Francis. Thermodynamique. Dunod, 2008

Méthodes générales d'enseignement

- Cours magistraux, études dirigées et travaux pratiques

Méthodes et critères généraux d'évaluation

Les modalités d'évaluation seront précisées par le responsable de l'Unité d'Enseignement en début de la séquence.



Décomposition en 3 modules

UEF ENGA (Energétique, avancé)				3 ECTS
Module	Turbomachines en régime incompressible cavitation (TFIC)	Turbomachines en régime compressible (TFC)	Introduction aux moteurs thermiques à combustion interne (MOTH)	Total
CM	10.5 h	4.5 h	6 h	21 h
ED	4.5 h	4.5 h		9 h
TP	3 h	3 h	4 h	10 h
Total	18 h	12 h	10 h	40 h



Cours Magistraux : 21 heures (Polycopiés du cours sur savoir)

- 6 séances sur les Turbomachines à Fluides Incompressibles (F. Ravelet – LIFSE).
- 1 séance sur la Cavitation (F. Ravelet – LIFSE).
- 3 séances sur les Turbomachines à Fluides Compressibles (P. Kuszla – DynFluid).
- 4 séances sur la Combustion et les Moteurs Alternatifs (E. Enjalbert – LMM : Le Moteur Moderne).



Écoulements dans les turbomachines (Florent Ravelet)

- Rappel des principaux types de turbomachines, notions générales sur les turbomachines axiales ou radiales, génératrices ou réceptrices.
- Application des équations de la continuité, de la dynamique (quantité de mouvement) et de l'énergie aux écoulements.
- Triangles des vitesses et performances théoriques : distributeurs, roue, diffuseur, volute, écoulement et performance, degré de réaction.
- Analyse globale des pertes : Pertes mécaniques et visqueuses. Rendements, performances.
- Application de la similitude aux machines à fluide incompressible : vitesse angulaire et rayon spécifiques, coefficients de Rateau, diagramme de Cordier, classification des machines.
- Méthodologie de dimensionnement simplifiée.



Cavitation dans les machines hydrauliques (Florent Ravelet)

- Notions sur les phénomènes physiques observés (qualité du liquide, figures de cavitation, bruit, érosion, désamorçage).
- Cavitation sur un profil.
- Cavitation dans les pompes, notions de NPSH requis et disponible.
- Conditions d'installation des pompes.



Turbomachines à fluides compressibles (Patrick Kuszla)

- Rappels des cycles thermodynamiques applicables aux machines tournantes. Anergie, exergie.
- Ecoulements adiabatiques : généralités, équation de l'énergie, célérité du son, nombre de Mach, température d'arrêt, ellipse des vitesses.
- Ecoulements isentropiques : relation de Hugoniot, tuyère convergente et applications.
- Discontinuité droite en repère relatif : relation de saut, choc droit.
- Application aux turbomachines à fluide compressible (compresseurs, turbines).



Notions de Combustion et Moteurs Alternatifs (Eric Enjalbert)

- Vitesses de propagation, températures.
- Mélange stœchiométrique, richesse.
- Pollution.
- Moteurs à combustion interne à allumage commandé et à autoallumage.
- Cycles thermodynamiques réels.
- Paramètres de fonctionnement. Puissances, rendements.
- Optimisation, pollution.



Exercices Dirigés : 9 heures (Enoncés sur savoir)

- 6 exercices.
- Appel avec notation.
- Participation active des élèves donnant lieu à une notation.
- 1 polycopié d'exercices commun.
- Fournitures à apporter : calculatrice, règle, équerre, compas, crayons de couleurs, etc.
Ou bien un ordinateur avec python et logiciel permettant de relever des cotes sur un plan (exemple [IMAGEJ](#))



Travaux Pratiques : 10 heures (Enoncés sur savoir)

- Pompe hydraulique (3 h).
- Turbine à gaz (3 h).
- Technologie des moteurs alternatifs (4 h).
- Appel. Eventuellement, test en début du TP sur le polycopié distribué à l'avance.
- Rapport personnel à rendre en fin de chaque TP et donnant lieu à une notation (CC).



- Contrôle continu : 3 notes de TP.
- Tests individuels en présentiel :
 - Combustion et Moteurs le 15/05/2023.
 - Turbomachines-Cavitation le 11/04/2023
 - Compressible le 10/05/2023.
- Note finale : 50% contrôle continu et 50% Test individuel.



Notions générales sur les turbomachines

Différentes catégories de machines à fluide



Machine à fluide : réalise un échange d'énergie entre un fluide et un dispositif mécanique.

Le transfert peut s'effectuer :

- dispositif mécanique vers fluide
⇒ **machine génératrice** (pompes, ventilateurs, soufflantes et compresseurs...)
- fluide vers partie mécanique ⇒
machine réceptrice ou motrice
(moteurs hydrauliques, turbines hydrauliques ou à gaz, roulette du dentiste, éoliennes...)



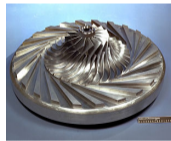
Pompe centrifuge



Turbomoteur d'hélicoptère



Ventilateur automobile



Turbine centripète sur gaz d'échappement



Eolienne à axe vertical

- **Machines à capsulisme** : machine cyclique en système fermé. Transfert d'énergie par variation de *volume* (pompes à piston ou moteurs thermiques à explosion).
- **Turbomachine** : machine à fluide en système ouvert, tournante. Parties fixes et mobiles imposent au fluide des variations de *vitesse* et de *direction*.



Fonctions et domaines industriels

- Récupérer l'énergie d'un fluide :
 - liquide : Récupération d'énergie potentielle (barrages hydrauliques).
 - gaz : Production d'énergie mécanique (roulette, turbocompresseur, turbopompes).
- Comprimer un gaz :
 - réseau d'air comprimé.
 - suralimentation moteur automobile.
- Transporter un fluide :
 - pompes pour vaincre la gravité.
 - pompes pour vaincre des pertes de charge.
- Production d'énergie à partir de sources thermiques (turbines à gaz et à vapeur).
- Production de poussée en aéronautique (turboréacteurs et turbofans).

Turbomachines : modélisation du régime d'écoulement



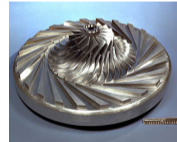
- Convention thermodynamique : *point de vue du fluide*, i.e. $E > 0$ si fournie au fluide.
- Variation état thermodynamique (pression, température, enthalpie massique, masse volumique, ...).
- Modèle de comportement du fluide :
 - Liquides, gaz en écoulement à faible vitesse par rapport à la vitesse du son : **écoulement incompressible**.
 - Gaz subissant de grandes détente ou compressions, en écoulement rapide : **écoulement compressible**.



Roue de turbine hydraulique Pelton **Incompressible**



Ventilateur **Incompressible**



Turbine centrifète **Compressible**

Turbomachines : classification(s)



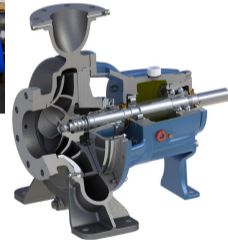
On distinguera donc les turbomachines :

- génératrices à fluide incompressible : pompes, ventilateurs.
- génératrices à fluide compressible : compresseurs.
- réceptrices à fluide incompressible : éoliennes, turbines hydrauliques.
- réceptrices à fluide compressible : turbines à gaz et à vapeur.



Turbine hydraulique Kaplan
Écoulement incompressible
Axiale

Pompe Centrifuge
Écoulement incompressible



Présent cours : **turbomachines à fluide incompressible, à écoulement interne** (parties fixes et mobiles situées à l'intérieur d'un carter, muni d'une bride d'entrée et d'une bride de sortie) : pompes et turbines hydrauliques.



Notion de charge hydraulique (1/2)

- Pour un fluide *parfait*, en écoulement incompressible (masse volumique $\rho = \text{cte}$), en régime stationnaire, on montre que le long d'une ligne de courant :

$$p + \frac{1}{2}\rho u^2 + \rho g z = \text{cte} = p_{tot}$$

- p est la pression, u la vitesse, g l'accélération de la pesanteur et z l'altitude.
- p_{tot} est la *pression totale*.
- Vérifier que les trois termes sont homogènes à une pression.
- Démonstration du « théorème de Bernoulli » ?



Notion de charge hydraulique (2/2)

- Ce « théorème » traduit la **conservation de l'énergie mécanique** pour une particule fluide, sans processus irréversibles.
- Montrer que $1 \text{ Pa} = 1 \text{ J.m}^{-3}$ (la pression thermodynamique est une densité volumique d'énergie).
- En divisant par ρ , on a une formulation en termes d'*énergie massique* (en J.kg^{-1}). L'**énergie mécanique totale par unité de masse** de la particule fluide e_{mech} est :

$$e_{mech} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}u^2 + gz$$

- Pour l'hydraulique à la surface de la terre, en divisant par la pesanteur de référence $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$, on obtient la *charge hydraulique* \mathcal{H} , en J.N^{-1} ou en mètre de colonne d'eau (m.c.e) :

$$\mathcal{H} = \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + z$$



Bilans d'énergie mécanique dans un circuit hydraulique (1/4)

- Dans un circuit, on va s'intéresser à des quantités *moyennées sur les sections* de conduite, en intégrant les équations générales de bilan sur des volumes de contrôles limités par ces sections.
- On considère ainsi des vitesses moyennes (ou souvent simplement *débitantes*) C , et des pressions moyennes sur les sections.
- En fluide réel, la viscosité est à l'origine de *frottements*, et d'une **dissipation irréversible** d'énergie mécaniqueⁱ correspondant au travail des forces intérieures : la « perte de charge ».
- Entre deux sections 1 et 2, sans échange de travail mécanique avec l'extérieur, la perte de charge (e_{loss} ou δp_{loss})ⁱⁱ vaut :

$$e_{mech,1} - e_{mech,2} = e_{loss} \text{ ou } p_{tot,1} - p_{tot,2} = \rho e_{loss} = \delta p_{tot,loss}$$

- On doit alors consulter des abaques ou utiliser des corrélations pour calculer cette perte de charge, souvent exprimée par un coefficient sans dimension ξ qui dépend de la vitesse d'écoulement, de la viscosité et de la géométrieⁱⁱⁱ

$$\delta p_{tot,loss} = \xi (Re, \dots) \frac{1}{2} \rho C^2$$

i. En quoi se traduit cette dissipation ?

ii. Remarque : $e_{loss} > 0$

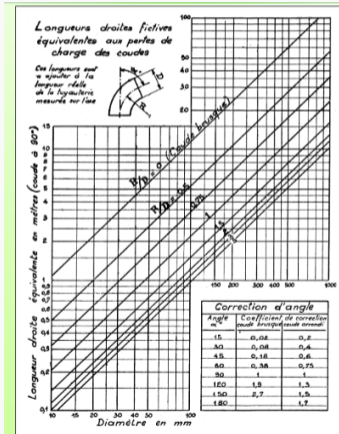
iii. Cette dépendance est exprimée en fonction du nombre de Reynolds Re et d'éventuels autres nombres sans dimension comme la rugosité relative,...

Rôle d'une turbomachine, rappels d'hydraulique



Bilans d'énergie mécanique dans un circuit hydraulique (3/4)

Les singularités sont représentées par des longueurs équivalentes ou des coefficients singuliers :



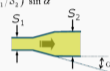
Élargissement brusque

$$K = (1 - S_1/S_2)^2$$



Divergent

$$K = (1 - S_1/S_2)^2 \sin \alpha$$



Rétrécissement brusque

$$K = (1/\mu - 1)^2$$

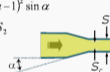
$$\mu = S_c/S_2$$



Convergent

$$K = (1/\mu - 1)^2 \sin \alpha$$

$$\mu = S_c/S_2$$



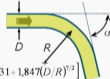
Coude brusque

$$K = \sin^2 \alpha + 2 \sin^4 \frac{\alpha}{2}$$



Coude arrondi

$$K = \frac{\alpha}{\pi} \left[0,131 + 1,847 (D/R)^{0,72} \right]$$



Entrée de canalisation brusque

$$K = 0,5$$



Entrée de canalisation progressive

$$K = 0,04$$





Bilans d'énergie mécanique dans un circuit hydraulique (4/4)

- Une pompe ou une turbine échange de l'énergie mécanique avec le fluide :
- Elle fait varier la charge hydraulique du fluide en conséquence, entre son aspiration a et son refoulement r .
- On parle de sa « Hauteur Manométrique Totale » (H_{MT}) ou de son Delta de pression totale (ΔP_t) :

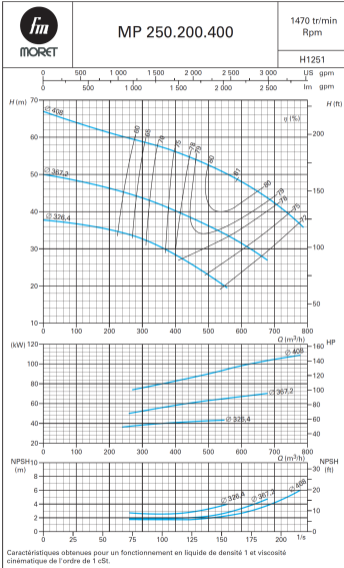
$$H_{MT} = \mathcal{H}_r - \mathcal{H}_a \text{ ou } \Delta P_t = p_{tot,r} - p_{tot,a}$$

- La H_{MT} d'une machine dépend du débit Q et $H_{MT} = f(Q)$ constitue sa *caractéristique*.
- Relation de Bernoulli généralisée entre un point 1 et un point 2 avec pompes, turbines^v et pertes de charge^{vi} :

$$\mathcal{H}(1) + H_{MT,pump} = \mathcal{H}(2) + |H_{MT,turbine}| + \delta\mathcal{H}_{1 \rightarrow 2}$$

v. On a $H_{MT,pump} > 0$ et en toute rigueur $H_{MT,turbine} < 0$

vi. Notée ici $\delta\mathcal{H}_{1 \rightarrow 2}$



Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge.

- $H_{MT\,pump} = f(Q_v)$ pour un fluide donné, à vitesse de rotation donnée;
- Puissance sur arbre $\mathcal{P}_a = f(Q_v)$;
- rendement global :

$$\eta_g = \frac{\rho g H_{MT\,pump} \times Q_v}{\mathcal{P}_a}$$

- $NPSH = f(Q_v)$: charge hydraulique totale minimale pour ne pas caviter.



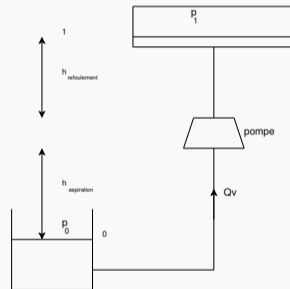
Exemple : un réseau hydraulique



Présentation du problème (1/2)

Une pompe centrifuge aspire de l'eau dans un premier réservoir ouvert et la refoule dans un réservoir fermé situé en altitude. Les caractéristiques de ce circuit sont les suivantes :

- La surface libre du premier réservoir est à la pression absolue $p_0 = 1$ bar. La section est de 100 m^2 , le niveau d'eau initial est de 0.1 m .
- Le tuyau d'aspiration a un diamètre de 100 mm , une rugosité de $500 \mu\text{m}$, et une longueur équivalente de 36 m . La hauteur géométrique à l'aspiration est $h_{ga} = 3 \text{ m}$.
- Le réservoir fermé est rempli d'air à la pression absolue $p_1 = 2$ bars. Sa hauteur est de 10 m et sa section de 100 m^2 .
- Le tuyau de refoulement a un diamètre de 100 mm , une rugosité de $500 \mu\text{m}$, et une longueur équivalente de 125 m . La hauteur géométrique au refoulement est $h_{gr} = 12 \text{ m}$.



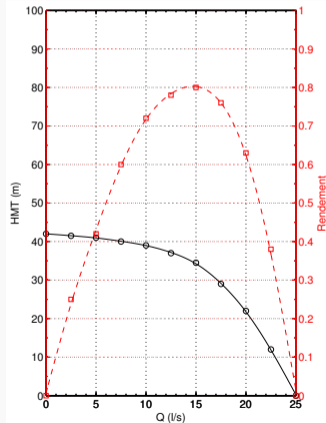
Exemple : un réseau hydraulique



Présentation du problème (2/2)

1. Calculer le débit de fonctionnement du système circuit et pompe, en supposant un fonctionnement stationnaire.
2. Quelle est la puissance dépensée ?
3. Que se passe-t-il si la section du réservoir haut diminue fortement ?

Caractéristiques de la pompe



Exemple : un réseau hydraulique



Éléments de correction (1/4)

Ici, on cherche H_{MT} la hauteur manométrique totale que doit fournir une pompe pour faire circuler un débit Q_v du point 0 au point 1. Si on écrit les pertes de charges $\delta\mathcal{H}$, on aura :

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_0 + H_{MT} &= \mathcal{H}_1 + \delta\mathcal{H} \\ \left(\frac{p_0}{\rho g} + z_0\right) + H_{MT} &= \left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1\right) + \delta\mathcal{H} \\ H_{MT} &= \frac{p_1 - p_0}{\rho g} + (z_1 - z_0) + \delta\mathcal{H} \\ H_{MT} &= \frac{p_1 - p_0}{\rho g} + (h_{ga} + h_{gr}) + \delta\mathcal{H}\end{aligned}$$

Interprétation : il faut que la pompe fournisse au fluide de quoi acquérir une surpression de $p_1 - p_0$, de quoi s'élever dans le champ de pesanteur de la hauteur géométrique entre 0 et 1, et de quoi vaincre les pertes de charge.

Exemple : un réseau hydraulique



Éléments de correction (2/4)

Il ne reste plus qu'à exprimer les pertes de charge dans la tuyauterie. On va utiliser une loi de perte de charge régulière. Par définition, le gradient de pression le long de la conduite de diamètre D s'exprime comme :

$$\frac{dP}{dx} = \lambda \frac{1}{2} \rho C^2 \frac{1}{D}$$

On utilise l'abaque du transparent 21. En écoulement turbulent développé et en tuyau rugueux, le coefficient devient indépendant du nombre de Reynolds. Dans l'exercice, pour une rugosité relative de $5^0/_{00}$ on lit $\lambda = 0.03$.

Exemple : un réseau hydraulique



Éléments de correction (3/4)

- Avec $Q_v = C \pi D^2 / 4$, on a donc :

$$\delta \mathcal{H} = \lambda L_{eq} \frac{C^2}{2Dg} = \lambda L_{eq} \frac{8}{\pi^2 D^5 g} Q_v^2$$

- Soit, avec q en l/s :

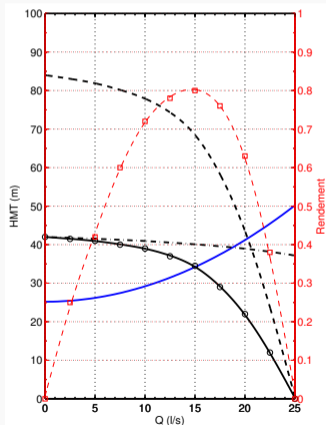
$$H_{MT} = 25.19 + 0.04 Q_v^2$$

- Point de fonctionnement, intersection de la caractéristique du circuit (en bleu) et de la caractéristique de la pompe (en noir) :

$$Q_v = 15 \text{ l/s}$$

$$H_{MT} = 34.2 \text{ m}$$

$$\eta = 0.8$$



Exemple : un réseau hydraulique



Éléments de correction (4/4)

- La puissance hydraulique vaut :

$$\mathcal{P} = (\rho g H_{MT}) \times Q_v = 5.03 \text{ kW}$$

La puissance à l'arbre vaut :

$$\mathcal{P}_a = 5.03 / (0.8) = 6.29 \text{ kW}$$

- En réalité, en remplissant d'eau le réservoir du haut, l'air sera comprimé : la condition de pression au refoulement varie, donc la caractéristique circuit se raidit au cours du temps : le point de fonctionnement se déplace (toujours sur la caractéristique machine).