

MINI CENTRALE HYDROELECTRIQUE

Manuel pratique

Cette séance de travaux pratiques permettra d'appréhender la mise en pratique d'un central hydroélectrique. L'objectif de la séance est double : Il faut comprendre le comportement d'une pompe qui joue le rôle d'un réservoir d'eau en haut, est caractérisée l'efficacité de les appareils de transformation de la énergie hydraulique en énergie électrique

Introduction

Les centrales hydroélectriques sont un des énergies renouvelables plus importantes actuellement. En collectant de l'eau dans un barrage, c'est possible extraire l'énergie potentielle stockée pour produire électricité.

Cet équipement a été conçu et construit spécialement pour un usage didactique. Il a pour but de familiariser les étudiants avec les paramètres caractérisant le fonctionnement de centrales hydrauliques produisant de l'énergie, dans le domaine de l'exploitation des énergies renouvelables. Il utilise une turbine hydraulique du type Pelton dans le domaine de la production d'énergie électrique réalisée par de petites installations desservies par de petits cours d'eau. L'énergie produite peut être utilisée pour alimenter des charges, comme les appareils électroménagers, les lampes ou pour chauffer de l'eau ou de l'air, comme indiqué de façon schématique à la Fig. 1.1.

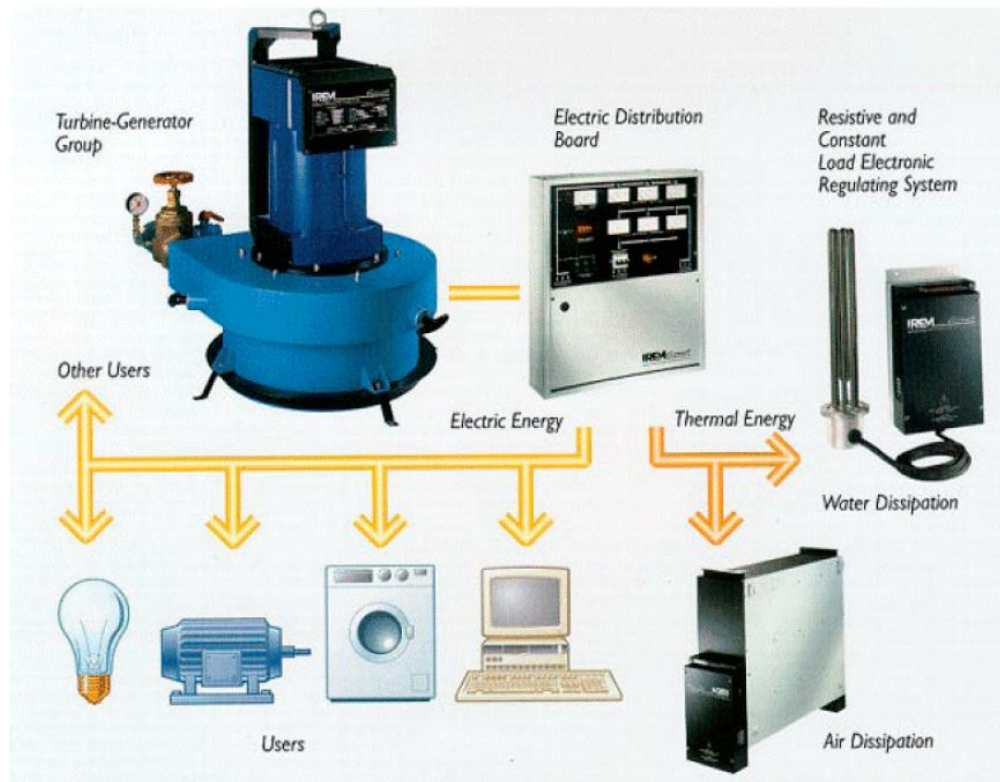


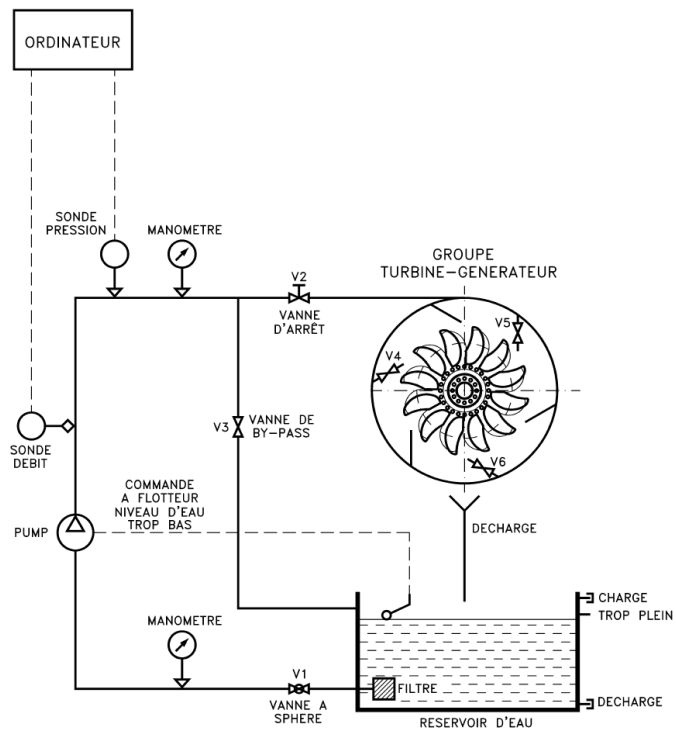
Fig 1.1 : Utilisation de l'énergie produite par la turbine Pelton

Vu la finalité de l'équipement, on a dû forcément renoncer à l'exploitation du saut utile et du débit d'eau fournis par un véritable cours d'eau ; ici, sa fonction est développée par la pompe multi-étages à axe horizontal fournie avec l'équipement (Fig. 1.2).



Fig. 1.2 - La micentrale hydroélectrique

1.2 Les composants



1.2.1 Le groupe Turbine Pelton – Générateur à axe vertical

Roue Pelton

La roue Pelton est réalisée complètement en acier INOX AISI 316 L ; les aubes sont obtenues par microfusion ; ce système permet d'obtenir une haute précision et un bon degré de finition. Les aubes sont fixées au disque-moyeu par soudage TIG sans ajout de matériau. Le disque moyeu est lui aussi en acier inoxydable et est directement rivé à l'arbre du générateur.

Diamètre primitif de la roue : 75 mm. Largeur de l'aube : 24 mm.

Caisson de la turbine

Le distributeur vers la turbine est à chambre continue, en acier soudé ; il est constitué par deux cylindres formant aussi le conduit d'adduction aux injecteurs. Le cylindre interne a aussi la fonction de recueillir et d'amener l'eau vers la bouche de décharge (vertical), outre que de fixer et de soutenir le groupe turbine-générateur grâce à des supports soudés sur la surface extérieure du cylindre. Les injecteurs, au nombre maximal de 6 (3 desquels réglables, en option), sont moulés en matière plastique de longue durée. Avec l'équipement on fournit 4 injecteurs de 3,8 mm de diamètre. La Fig. 1.3 montre le détail d'un injecteur réglable.

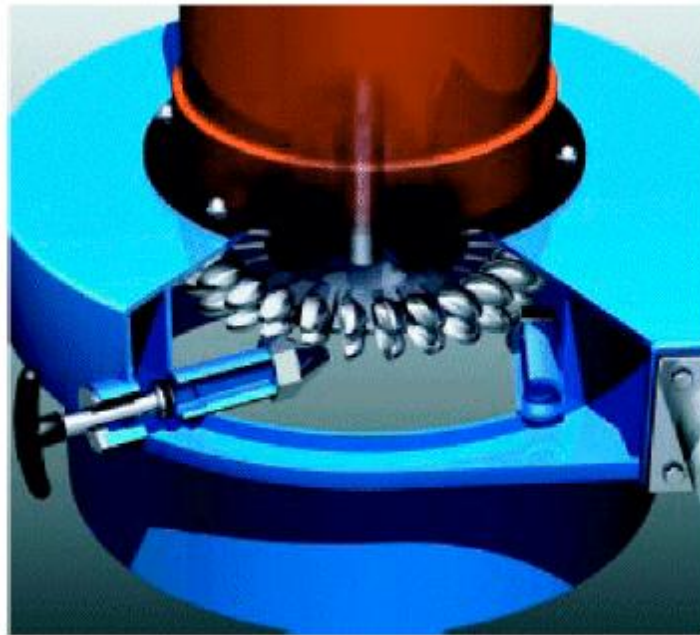


Fig. 1.3 - Détail de l'injecteur réglable

Générateur G 503/B

On emploie un générateur synchrone triphasé à aimants permanents sans balais. Les roulements à billes sont du type "étanche" et ne nécessitent donc aucune lubrification. Le générateur est séparé de la turbine par un écran spécial empêchant tout contact avec l'eau.

Les données de la plaque de fabrication sont les suivantes :

- Tension : 20 V triphasée
- Puissance : 500 W
- N° de pôles : 8
- Vitesse : 2500/ 3000 tours/mn.

Selon les sauts et des débits présents, le générateur pourra fonctionner à des valeurs de fréquence et de tensions différentes des valeurs nominales, aussi ne devra-t-on pas relier des utilisateurs directement au générateur. Le rendement du générateur est d'environ 0,85.

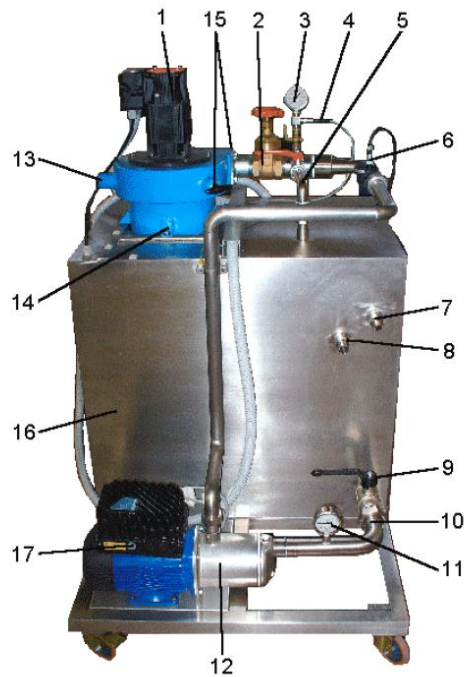
Groupe d'alimentation

Il sert à relier la conduite forcée (dans le banc elle est remplacée par un simple tuyau) au caisson de la turbine ; il est constitué par un tube d'introduction sur lequel a été montée la vanne de commande de l'installation, un raccord pour le manomètre, un manomètre et une prise d'eau sous pression latérale (by-pass).

Diamètre d'entrée : 2" mâle

Vanne générale 2" PN25 ; by-pass avec vanne à sphère et robinet.

2.1 Préparation du banc



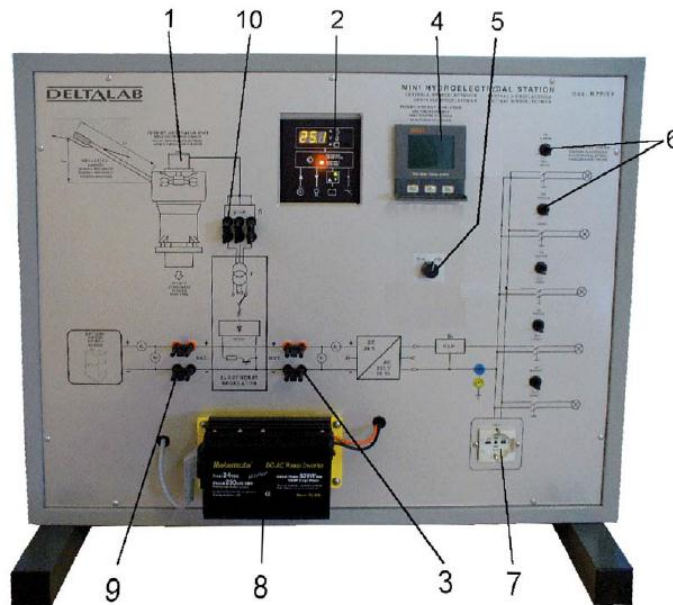
- | | |
|--|---|
| 1 – Groupe turbine-générateur | 10 – Décharge |
| 2 – Vanne d'arrêt | 11 – Manomètre de basse pression |
| 3 – Manomètre de haute pression | 12 – Pompe |
| 4 – Capteur de haute pression | 13 – Vanne d'arrêt de l'injecteur |
| 5 – Vanne à sphère de by-pass | 14 – Vis de fixation turbine-réservoir |
| 6 – Capteur de débit | 15 – Vis de fixation générateur-distributeur |
| 7 – Charge de l'installation | 16 – Réservoir |
| 8 – Trop-plein | 17 – Potentiomètre de commande du nombre de tours de la pompe |
| 9 – Vanne à sphère de l'alimentation de la pompe | |

Fig 2.1

Disposition hydraulique

- Se référer à la fig. 2.1 : procéder comme on l'indique ci-après.
- Ouvrir la vanne à sphère sur la ligne d'alimentation de la pompe (9).
- Ouvrir complètement la vanne d'arrêt sur la ligne d'alimentation de la turbine (2 – manette complètement tournée dans le sens contraire à celui des aiguilles d'une montre).
- Relier le trop-plein du réservoir d'eau (8) au réseau de décharge
- Après avoir vérifié que le bouchon de décharge (10) n'a pas été enlevé, relier le manchon de charge (7) au réseau d'alimentation d'eau et remplir le réservoir jusqu'à ce que l'eau arrive au trop-plein.

2.2 Mise en marche



- | | |
|--|--|
| 1 – Synoptique | 6 – Interrupteurs des charges électriques |
| 2 – Tableau du régulateur R500 | 7 – Prise de courant de la charge auxiliaire |
| 3 – Pontet de l'inverseur | 8 – Inverseur |
| 4 – Instrument 396 | 9 – Pontet de la batterie |
| 5 – Commutateur de sélection de lecture des paramètres électriques | 10 – Pontet du générateur |

Fig 2.2

- Alimenter électriquement le banc en mettant sur ON l'interrupteur magnétothermique différentiel et l'interrupteur général.

- En partant de zéro, augmenter progressivement la fréquence appliquée à l'inverseur contrôlant le nombre des tours de la pompe. Le régulateur externe dissipe la puissance excédante à travers la résistance de lest. Pour exploiter la puissance générée, on devra donc :

- allumer l'inverseur ;

- allumer une lampe ou plus (interrupteurs Fig. 2.2, 6 sur ON).

Quand la tension d'alimentation de l'inverseur descend en dessous d'un certain seuil, l'inverseur se met en attente (stand-by), cette condition restant jusqu'à ce que la tension retourne à des niveaux acceptables. Si la tension descend en dessous du niveau minimal (21,0 Vcc), l'inverseur s'éteint pour éviter qu'une éventuelle batterie d'alimentation ne se décharge complètement. Dans ce cas, pour rétablir le système, l'opérateur devra nécessairement intervenir et devra éteindre et rallumer

manuellement l'inverseur. Si une condition de surcharge surgit pendant le fonctionnement, l'inverseur s'éteindra pour se protéger.

En cas de court-circuit aussi, l'inverseur procède directement à l'extinction automatique.

Note : Chaque fois que le dispositif s'éteint automatiquement, pour réactiver l'inverseur, on doit d'abord l'éteindre, puis vérifier si les utilisateurs reliés sont bien désactivés et enfin rallumer l'inverseur.

N.B. Pour des raisons de sécurité, à l'intérieur du réservoir de charge se trouve un capteur de niveau qui interrompt l'alimentation électrique de la pompe si le niveau de l'eau est trop bas. Dans ce cas, pour rétablir les conditions opérationnelles correctes, on devra charger complètement le réservoir comme on l'a vu plus haut.

N.B. L'utilisation du banc d'essai ne devra être permise aux étudiants que sous la directe surveillance de la part d'un personnel technique habilité ayant bien pris connaissance de toutes les informations inhérentes au bon fonctionnement de chaque composant du banc, aux opérations servant à utiliser le banc en toute sécurité et, ceci n'étant pas moins important, aux éventuelles procédures d'urgence.

Modification de la configuration des injecteurs

Comme on l'a vu, le distributeur de la turbine possède 4 injecteurs de 3,8 mm de diamètre (Fig. 2.3 ; on remarquera que deux injecteurs, celui du bas à droite et celui du bas à gauche, sont en réalité des bouchons). Grâce aux vannes d'arrêt des injecteurs (Fig. 2.1, pos. 13) permettant de couper l'alimentation de trois injecteurs, il est possible de modifier la configuration de l'installation et d'en vérifier l'incidence sur le fonctionnement global (voir la Fig. 2.3).

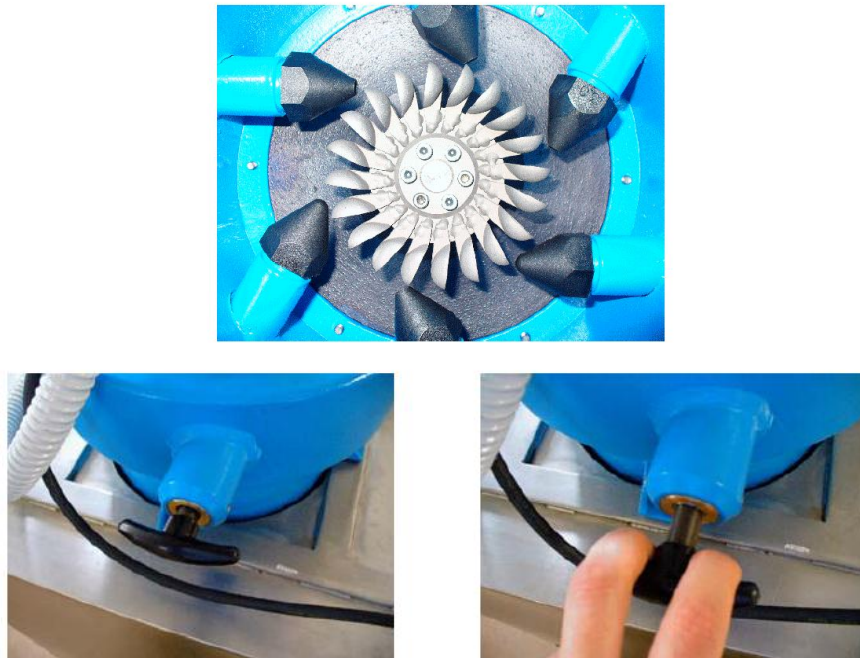


Fig 2.3 : Vanne d'arrêt des injecteurs : à gauche, fermée, à droite : ouvert .

SYSTEME DE SUPERVISION ET D'ACQUISITION DE DONNEES

L'entraîneur d'essai de la minicentrale hydroélectrique mod. WPP/EV est muni d'un système d'acquisition de données et supervision qui permet, au moyen d'un Ordinateur Personnel, de contrôler les paramètres de fonctionnement de ce même panneau. Les données acquises, comme, par exemple, la pression et le débit d'entrée du distributeur de la turbine, peuvent être affichées et traitées par logiciel ; ainsi on pourra obtenir des grandeurs dérivées de ces données, comme la puissance entrant dans le distributeur, l'efficacité de conversion de l'énergie du groupe turbine - générateur, etc., et on pourra suivre les évolutions de ces grandeurs dans le temps.

On peut ouvrir le système d'acquisition en cliquant sur WPP1210db dans le Bureau sur le compte Invité.

Dans la page-écran de Supervision, qui montre la disposition des composants de l'entraîneur, on a employé des blocs *Math Function* (qui développent des opérations mathématiques) et des blocs *Display Function* du type Digital Meter (afficheurs de tension, courant, ...). La page-écran est montrée à la fig. 2.4 et permet d'afficher :

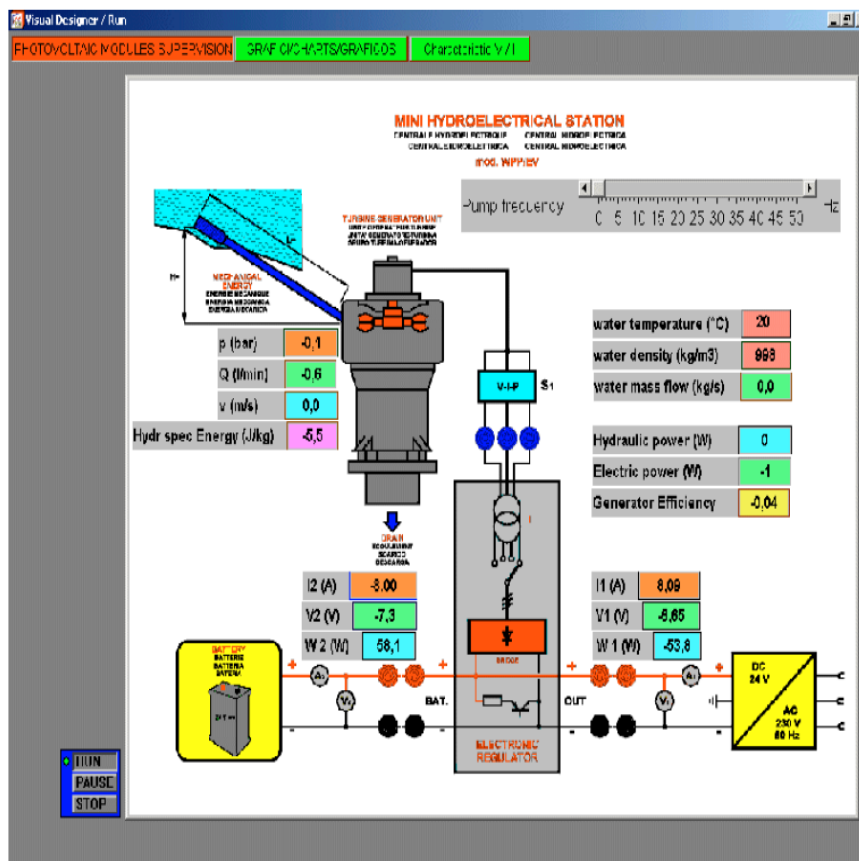


Fig 2.4

C'est aussi possible représenter les cours dans le temps des puissances électriques W1 (en amont de l'inverseur), W2 (batterie), Wel (produite par le générateur) et de la puissance hydraulique W_{hy} (à l'entrée de la turbine).

EXERCISES :

Exercice 1: CALCUL DE L'ENERGIE HYDRAULIQUE SPECIFIQUE DE L'EAU EN AMONT DES INJECTEURS

Par référence à la figure 3.1, l'énergie spécifique de l'eau h en correspondance de la section 0 – 0 est exprimée en général par la somme des termes cinétique, piézométrique et géodétique, selon la formule :

$$gh = \frac{v_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} + gz_0$$

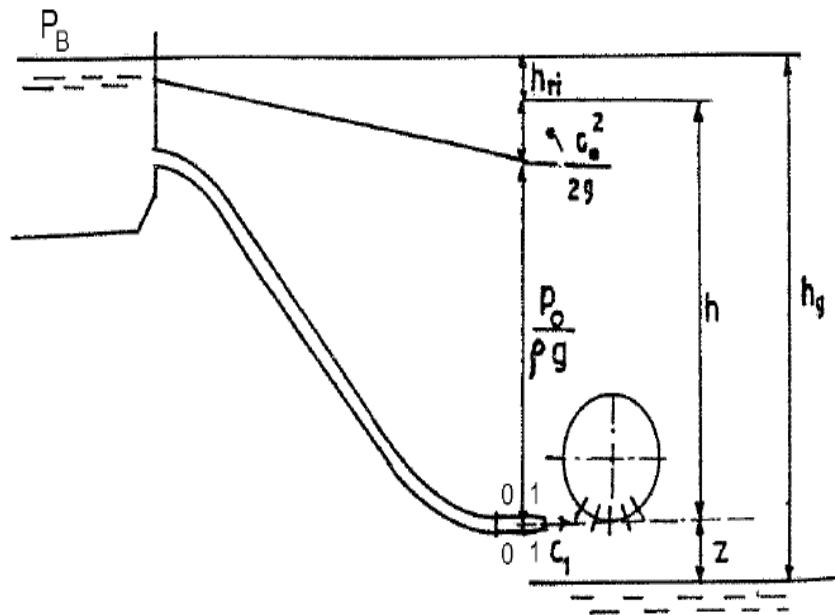


Fig. 3.1

où :

v_0 = vitesse moyenne du fluide dans la section 0 - 0 (m/s) ;

g = accélération de gravité, constante et égale à 9,81 m/s² ;

p_0 = pression du fluide dans la section 0 – 0 (Pa) ;

ρ = densité du fluide ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) ;

z_0 = cote de l'axe du conduit par rapport à un plan de référence (m).

En considérant comme valeur de référence des ordonnées l'axe du tuyau d'adduction ($z_0 = 0$), on a :

$$H = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho g}$$

A son tour, la vitesse du fluide peut être exprimée comme suit :

$$v_0 = \frac{Q}{A}$$

où :

Q = débit dans le tuyau d'adduction (m³/s) ;

A_0 = surface la section 0 – 0 (m²), égale à :

$$A_0 = \frac{\pi \phi_0^2}{4}$$

ϕ_0 étant le diamètre interne (m), constant et égal à 54 mm.

On trouvera la valeur de Q grâce au capteur de débit, celle de p_0 grâce au capteur de pression ou au manomètre situé à l'entrée de la turbine. Avec ces données, on pourra calculer l'énergie spécifique de l'eau en amont des injecteurs.

Configuration du système :

Vannes V1, V2, V4, V5, V6 Ouvertes

Vanne V3 Fermée

Injecteurs 2 ϕ 3,8 mm, 2 bouchons (par défaut il y a un injecteur qui est toujours ouvert, donc, ouvrir manuellement un seulement)

Pontets du générateur Présents

Pontets de la batterie Absents

Pontets de la charge Absents

Commutateur de l'instrument 396 Position S1 (tri-phaisque)

Vitesse de la pompe Maximale (petit roué blanc dans la pompe)

Calculer la contribution de l'énergie de pression et cinématique (en mètres de liquide ou J/Kg)

Exercice 2: CALCUL DE LA PUISSANCE HYDRAULIQUE ENTRANT DANS LE DISTRIBUTEUR

Lorsque l'on connaît le contenu énergétique spécifique de l'eau en amont de la turbine, pour calculer la puissance entrant dans le distributeur W_{hyd} il suffit de le multiplier par le débit massique qui s'écoule. On obtient alors :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho Q \\ W_{hyd} &= \dot{m}gh \end{aligned}$$

Exercice 3 : EVALUATION DE LA PUISSANCE ELECTRIQUE GENEREE ET CALCUL DU RENDEMENT TOTAL DU GROUPE DISTRIBUTEUR – TURBINE – GENERATEUR

La puissance électrique générée W_{el} se lit directement sur le logiciel. En divisant cette valeur par la puissance hydraulique entrant dans le distributeur, on trouve le rendement total du groupe distributeur – turbine – générateur :

$$\eta_{tot} = \frac{W_{el}}{W_{hyd}}$$

On remarquera que le rendement total peut être exprimé sous forme de produit entre le rendement distributeur-injecteur, le rendement hydraulique et le rendement électrique :

$$\eta_{tot} = \eta_u \eta_{hyd} \eta_{el}$$

Exercice 4 : COURBE CARACTERISTIQUE H-Q.

En tournant V2 (Fig 2.1) c'est possible tester l'efficacité du système pour de différents auteurs. Ajuster V2 pour changer le niveau de pression à l'entrée de la turbine. Monter progressivement la pression et répéter le calculs des exercices 1,2,3 tous les 0.5 bars jusqu'à obtenir un niveau de pression à l'entrée égal à 5.5atm. Répéter les essais avec 0,1,2 et 3 injecteurs ouverts

Représenter la courbe H-Q avec l'information obtenu dans la même figure.

En tournant la petit roué blanc dans la pompe, obtenir la même figure pour une puissance inferieur

Exercice 5 : COURBES W-Q.

Avec les informations obtenues dans l'exercice précédent, représenter les courbes W-Q avec un, deux et trois injecteurs ouverts (pompe à la puissance maximale)

Quel est le nombre des injecteurs plus efficace ?

Pour quel flux on obtienne une puissance maximale ?

Exercice 6 : CALCUL DE LA VITESSE DE ROTATION ET DE LA VITESSE PERIPHERIQUE DE LA TURBINE

Ajuster les paramètres pour travailler dans le régime nominal (puissance maximale) trouvé dans l'exercice 5.

L'a fréquence f du courant électrique généré se lit directement sur l'instrument 396, en sélectionnant la page appropriée. Vu que le générateur est synchrone, cette fréquence coïncide avec la fréquence de rotation de la turbine, dont le nombre de tours par minute n se calcule à l'aide de l'expression suivante :

$$n = \frac{60f}{p}$$

p étant le nombre de paires polaires du générateur, égal à 4.

La vitesse angulaire ω de la turbine est égale à :

$$\omega = \frac{2\pi}{60}n$$

à laquelle correspond une vitesse périphérique, au niveau de la circonférence primitive de la roue Pelton, égale à :

$$u = \omega \frac{D}{2}$$

Exercice 7 : CONSIDERATIONS SUR LA VITESSE DE L'EAU A LA SORTIE DES INJECTEURS

Se référer toujours à la figure 3.1. Un bilan énergétique entre les sections 0 - 0 et 1 - 1, en l'absence de pertes, permet de trouver la vitesse idéale v_{1i} d'écoulement au niveau des injecteurs ; en se rappelant que dans la section 1 - 1 la pression correspond à la pression atmosphérique, on aura :

$$H = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho g}$$

d'où on tirera :

$$v_1^2 = 2gH$$

En réalité, à cause des pertes, la vitesse effective est inférieure et égale à :

$$v_{1r} = \varphi v_1 = \varphi \sqrt{2gH}$$

où φ est le coefficient d'écoulement, un terme adimensionnel et généralement compris entre 0,96 et 0,98 dans le cas de turbines de grand diamètre. On calcule la vitesse v_1 à l'aide de l'équation :

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} z v_1$$

où :

d = diamètre des injecteurs, égal à 3,8 mm ;

z = nombre des injecteurs (égal à 4).

Avec ces relations, calculer φ .

On remarquera qu'en calculant la puissance hydraulique de la veine fluide intéressant les aubes de la turbine à une vitesse v_1 , on obtient :

$$E = \dot{m} \frac{v_1^2}{2}$$

Cette valeur peut être inférieure à la puissance électrique de sortie de la machine et donc impossible. Ceci peut être justifié par le fait qu'en réalité la valeur de la vitesse de l'eau sortant de l'injecteur est supérieure à v_1 à cause de la contraction de la veine fluide.

Exercice 8 : CALCUL DU COUPLE MOTEUR SUR L'ARBRE

On calcule le couple moteur à l'aide de la formule :

$$C = \frac{P}{\omega}$$

où P est la puissance sur l'axe de la turbine, que l'on peut évaluer comme suit :

$$P = \frac{W_{el}}{\eta_{el}}$$

Dans notre cas, on suppose un rendement électrique de 90%,

Exercice 9 : CALCUL DE LA CONSTANTE CARACTERISTIQUE DE LA TURBINE PELTON FOURNIE AVEC L'EQUIPEMENT

La constante caractéristique ns d'une turbine peut s'exprimer généralement comme suit :

$$ns = nP^{1/2}H^{-5/4}$$

où :

n = vitesse de rotation de la turbine (tours/mn) ;

P = puissance sur l'axe de la turbine (kW) ;

H = saut moteur (m).

Pour les turbines Pelton, on a en général : $15 \leq ns \leq 60$.

Exercice 10 : CALCUL DU RENDEMENT DU REGULATEUR EN FONCTION DE LA CHARGE ELECTRIQUE APPLIQUEE

Comme on l'a vu, le régulateur, de type électronique, sert à maintenir la charge constante : la turbine et le générateur travaillent toujours à pleine charge, parce que l'énergie non utilisée se dissipe dans une résistance de lest. Si l'on veut faire un bilan énergétique global du régulateur, il suffit de calculer le rapport entre la puissance P_1 de sortie du régulateur vers l'inverseur (que l'on peut calculer sous forme de produit entre la tension V_1 et le courant A_1 , ces valeurs étant mesurées par les instruments fournis avec l'équipement) et la puissance d'entrée P_{S1} :

$$\eta_{reg} = \frac{P_1}{P_{S1}}$$

Compléter le tableau suivant en fonction de la charge électrique appliquée (c'est-à-dire des lampes allumées) :

N lampes allumées	V1(V)	A1 (A)	P1=V1*A1	Ps1	Rendement du regulateur
1					
2					
3					
4					
5					

On remarquera que le rendement croît au fur et à mesure que le nombre de lampes allumées augmente, car la puissance dissipée dans la résistance de lest se réduit. On remarquera en outre

que, même si la résistance dissipée dans la résistance de lest est nulle, le rendement du régulateur ne correspondrait pas de toute façon à l'unité, à cause de la présence du redresseur qui provoque des pertes d'énergie, si basses soient-elles.

Exercice 11 : CALCUL DE VERIFICATION DE L'ABSENCE DE CAVITATION A L'ENTREE D'ASPIRATION DE LA POMPE

Afin qu'il n'y ait pas de cavitation au niveau de l'entrée d'aspiration de la pompe de l'installation, on doit vérifier que la NPSH (de l'anglais *Net Positive Suction Head*) requise par la machine (NPSHR) est inférieure à la NPSH disponible (NPSHD) au niveau de l'entrée d'aspiration. La NPSHR requise par la machine est un paramètre, dépendant du débit élaboré, fourni par le fabricant (voir la Fig. 1.8). Si l'on considère un débit de 45 l/mn, on obtient :
NPSHR = 2 m c.a.

On calcule la NPSHD disponible au niveau de l'entrée d'aspiration à l'aide de la formule suivante :

$$NPSH_D = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - z_a - h_r$$

où :

p_B = pression barométrique sur la surface libre du réservoir;

p_v = tension de vapeur à la température du fluide (Tableau A) ;

z_a = différence de niveau entre la cote du point le plus haut de l'entrée d'aspiration de la pompe et le niveau du réservoir (positif, si la pompe est plus haute) ;

h_r = pertes de charge dans le conduit d'aspiration.

Par référence au schéma hydraulique du banc, les pertes de charge en aspiration sont :

- pertes concentrées à l'entrée h_{ri} , que l'on peut évaluer en utilisant la formule :

$$h_{ri} = 0.5 \frac{v^2}{2g}$$

Où v est la vitesse moyenne du fluide dans la section d'entrée ;

- pertes concentrées sur la courbe à 90° h_{rg} (reportées dans le Tableau B, en fonction de la vitesse du fluide) ;
- pertes distribuées le long du tuyau d'aspiration h_{rd} (reportées dans le Tableau C, en fonction du diamètre du tuyau ϕ et de la vitesse du fluide).

En considérant que le tuyau de 1"¼ (diamètre interne de 30 mm environ) a une longueur de 0,5 m, avec un débit de 45 l/mn (0,00075 m³/s) et en supposant que la pression barométrique est égale à 101,325 Pa, calculer le valeur de NPSHD.

t °C	p_v kg/cm ²	γ kg/dm ³	t °C	p_v kg/cm ²	γ kg/dm ³	t °C	p_v kg/cm ²	γ kg/dm ³	t °C	p_v kg/cm ²	γ kg/dm ³
0	0,0062	0,9998	41	0,793	0,9917	82	0,5234	0,9705	170	8,076	0,8973
1	0,0067	0,9999	42	0,836	0,9913	83	0,5447	0,9698	175	9,101	0,8920
2	0,0072	0,9999	43	0,0881	0,9909	84	0,5667	0,9693	180	10,225	0,8869
3	0,0077	1,0000	44	0,0928	0,9905	85	0,5897	0,9687	185	11,456	0,8814
4	0,0083	1,0000	45	0,0977	0,9900	86	0,6129	0,9680	190	12,800	0,8760
5	0,0089	1,0000	46	0,1028	0,9898	87	0,6372	0,9673	195	14,265	0,8703
6	0,0095	0,9999	47	0,1082	0,9883	88	0,6623	0,9667	200	15,857	0,8646
7	0,0102	0,9999	48	0,1138	0,9889	89	0,6882	0,9659	205	17,858	0,8587
8	0,0109	0,9998	49	0,1197	0,9885	90	0,7149	0,9653	210	19,456	0,8528
9	0,0117	0,9997	50	0,1258	0,9880	91	0,7425	0,9646	215	21,477	0,8465
10	0,0125	0,9996	51	0,1322	0,9876	92	0,7710	0,9640	220	23,659	0,8403
11	0,0134	0,9995	52	0,1388	0,9871	93	0,8004	0,9632	225	26,007	0,8339
12	0,0143	0,9994	53	0,1457	0,9866	94	0,8307	0,9625	230	28,531	0,8272
13	0,0153	0,9993	54	0,1530	0,9861	95	0,8619	0,9619	235	31,239	0,8206
14	0,0163	0,9992	55	0,1605	0,9857	96	0,8942	0,9611	240	34,140	0,8136
15	0,0174	0,9990	56	0,1683	0,9852	97	0,9271	0,9604	245	37,244	0,8064
16	0,0185	0,9989	57	0,1765	0,9847	98	0,9616	0,9596	250	40,560	0,7992
17	0,0197	0,9987	58	0,1850	0,9842	99	0,9969	0,9590	255	44,100	0,7918
18	0,0210	0,9985	59	0,1939	0,9836	100	1,0032	0,9583	260	47,870	0,7840
19	0,0224	0,9984	60	0,2031	0,9831	102	1,1092	0,9568	265	51,880	0,7759
20	0,0238	0,9982	61	0,2127	0,9826	104	1,1898	0,9554	270	56,140	0,7678
21	0,0253	0,9979	62	0,2227	0,9821	106	1,2751	0,9540	275	60,660	0,7593
22	0,0269	0,9977	63	0,2330	0,9816	108	1,6354	0,9525	280	65,460	0,7506
23	0,0286	0,9974	64	0,2438	0,9810	110	1,4609	0,9510	285	70,540	0,7416
24	0,0304	0,9972	65	0,2550	0,9804	112	1,5618	0,9495	290	75,920	0,7323
25	0,0323	0,9970	66	0,2666	0,9800	114	1,6684	0,9479	286	81,600	0,7227
26	0,0343	0,9966	67	0,2787	0,9794	116	1,7809	0,9464	300	87,610	0,7214
27	0,0363	0,9964	68	0,2912	0,9788	118	1,8995	0,9448	305	93,950	0,7017
28	0,0385	0,9961	69	0,3042	0,9782	120	2,0245	0,9431	310	100,640	0,6906
29	0,0408	0,9957	70	0,3177	0,9777	122	2,1561	0,9414	315	107,690	0,6793
30	0,0432	0,9955	71	0,3317	0,9771	124	2,2947	0,9398	320	115,130	0,6671
31	0,0458	0,9952	72	0,3463	0,9765	126	2,4404	0,9381	325	122,950	0,6540
32	0,0485	0,9949	73	0,3613	0,9759	128	2,5935	0,9365	330	131,180	0,6402
33	0,0513	0,9946	74	0,3869	0,9754	130	2,7544	0,9348	335	139,850	0,6257
34	0,0542	0,9942	75	0,3931	0,9748	135	3,1920	0,9305	340	148,960	0,6093
35	0,0573	0,9939	76	0,4098	0,9742	140	3,6850	0,9260	345	157,540	0,5910
36	0,0606	0,9934	77	0,4274	0,9737	145	4,2370	0,9216	350	168,630	0,5724
37	0,0640	0,9932	78	0,4451	0,9730	150	4,8540	0,9169	355	179,240	0,5512
38	0,0675	0,9928	79	0,4637	0,9724	155	5,5400	0,9121	360	190,420	0,5243
39	0,0713	0,9925	80	0,4829	0,9718	160	6,3020	0,9073	365	202,210	0,4926
40	0,0752	0,9921	81	0,5028	0,9712	165	7,1460	0,9023	370	214,680	0,4484

Tableau A : Tension de vapeur et densité de l'eau en fonction de la température

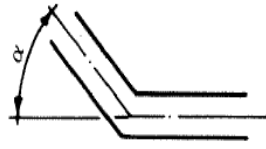
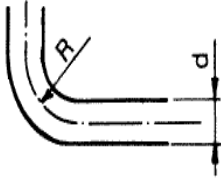
Vitesse de l'eau, m/s	COUDES A ANGLE VIF					COUDES NORMAUX					Vannes d'arrêt normales	Vanne de fond	Vanne de rétention	Pertes d'énergie à la sortie des tuyaux de décharge $V^2 \cdot 2G$
														
	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 80^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\frac{d}{R} = 0,4$	$\frac{d}{R} = 0,6$	$\frac{d}{R} = 0,8$	$\frac{d}{R} = 1$	$\frac{d}{R} = 1,5$				
0,10	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,07	0,08	0,01	0,0155	0,027	0,03	30	30	0,05
0,15	0,06	0,73	0,1	0,14	0,17	0,016	0,019	0,024	0,033	0,06	0,033	31	31	0,12
0,2	0,11	0,13	0,18	0,26	0,31	0,028	0,033	0,04	0,059	0,11	0,058	31	31	0,21
0,25	0,17	0,21	0,28	0,4	0,48	0,044	0,052	0,063	0,091	0,17	0,09	31	31	0,32
0,3	0,25	0,3	0,41	0,6	0,7	0,063	0,074	0,09	0,13	0,25	0,13	31	31	0,46
0,35	0,33	0,4	0,54	0,8	0,93	0,085	0,10	0,12	0,18	0,33	0,18	31	31	0,62
0,4	0,43	0,52	0,71	1,0	1,2	0,11	0,13	0,16	0,23	0,43	0,23	32	31	0,82
0,5	0,67	0,81	1,1	1,6	1,9	0,18	0,21	0,26	0,37	0,67	0,37	33	32	1,27
0,6	0,97	1,2	1,6	2,3	2,8	0,25	0,29	0,36	0,52	0,97	0,52	34	32	1,84
0,7	1,35	1,65	2,2	3,2	3,9	0,34	0,40	0,48	0,70	1,35	0,7	35	32	2,5
0,8	1,7	2,1	2,8	4,0	4,8	0,45	0,53	0,64	0,93	1,7	0,95	36	33	3,3
0,9	2,2	2,7	6	5,2	6,2	0,57	0,67	0,82	1,18	2,2	1,2	37	34	4,2
1,0	2,7	3,3	4,5	6,4	7,6	0,7	0,82	1,0	1,45	2,7	1,45	38	35	5,1
1,5	6,0	7,3	10,0	14,0	17,0	1,6	1,9	2,3	3,3	6,0	3,3	47	40	11,5
2,0	11,0	14,0	18,0	26,0	31,0	2,8	3,3	4,0	5,8	11,0	5,8	61	48	20,4
2,5	17,0	21,0	28,0	40,0	48,0	4,4	5,2	6,3	9,1	17,0	9,1	78	58	32,0
3,0	25,0	30,0	41,0	60,0	70,0	6,3	7,4	9,0	13,0	25,0	13,0	100	71	46,0
3,5	33,0	40,0	55,0	78,0	93,0	8,5	10,0	12,0	18,0	33,0	18,0	123	85	62,0
4,0	43,0	52,0	70,0	100,0	120,0	11,0	13,0	16,0	23,0	42,0	23,0	150	100	82,0
4,5	55,0	67,0	90,0	130,0	160,0	14,0	21,0	26,0	37,0	55,0	37,0	190	120	103,0
5,0	67,0	82,0	110,0	160,0	190,0	18,0	29,0	36,0	52,0	67,0	52,0	220	140	127,0

Tableau B - Pertes de charge, en cm c.a., dans les coudes, robinets, vannes

v	Q h	DIAMETRE DES TUYAUX, en mm																	
		20	25	30	40	50	65	80	100	125	150	175	200	250	300	350	400	450	500
0,5	Q	9,4	14,7	21,2	37,7	59,0	115	151	235	369	530	723	940	1480	2120	2880	3770	4780	5890
	h	2,4	1,9	1,5	1,0	0,8	0,56	0,46	0,36	0,28	0,23	0,19	0,16	0,13	0,105	0,089	0,076	0,067	0,06
0,6	Q	11,3	17,7	25,4	45,3	70,7	138	181	282	442	636	887	1130	1770	2540	3460	4520	5730	7060
	h	3,3	2,6	2,1	1,5	1,12	0,78	0,65	0,5	0,39	0,32	0,27	0,23	0,18	0,15	0,12	0,11	0,096	0,086
0,7	Q	13,2	20,6	29,7	52,9	82,5	161	211	329	516	742	1010	1315	2070	2960	4040	5270	6690	8250
	h	4,4	3,4	2,7	1,9	1,5	1,0	0,86	0,67	0,52	0,43	0,36	0,31	0,24	0,2	0,17	0,15	0,13	0,12
0,8	Q	15,05	23,6	33,9	60,4	94,5	184	241	377	590	848	1155	1505	2360	3390	4620	6030	7650	9420
	h	5,6	4,3	3,4	2,5	1,9	1,3	1,1	0,86	0,67	0,55	0,46	0,4	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15
0,9	Q	16,95	26,5	38,2	68,0	106,0	207	272	423	664	955	1300	1695	2660	3810	5200	6780	8600	10600
	h	6,9	5,3	4,3	3,0	2,4	1,7	1,4	1,1	0,84	0,69	0,58	0,5	0,39	0,32	0,27	0,24	0,21	0,19
1,0	Q	18,8	29,5	42,4	75,5	117,7	230	302	471	737	1060	1445	1880	2950	4230	5770	7530	9550	11770
	h	8,3	6,4	5,1	3,7	2,9	2,1	1,7	1,3	1,0	0,84	0,71	0,61	0,48	0,4	0,34	0,29	0,26	0,23
1,1	Q	20,7	32,4	46,6	83,0	129,5	252	332	518	81	1165	1585	2070	3250	4650	6350	8290	10500	12950
	h	9,9	7,6	6,2	4,4	3,4	2,4	2,0	1,6	1,2	1,0	0,85	0,74	0,58	0,48	0,4	0,35	0,31	0,28
1,2	Q	22,6	35,4	50,9	90,6	141,0	276	362	565	885	1272	1730	2260	3550	5080	6930	9040	11450	14140
	h	11,7	9,0	7,2	5,2	4,0	2,9	2,4	1,9	1,5	1,2	1,0	0,87	0,69	0,56	0,48	0,42	0,37	0,32
1,3	Q	24,5	38,3	55,0	98,0	153,0	299	392	612	960	1378	1875	2450	3840	5500	7500	9800	12400	15320
	h	13,5	10,4	8,4	6,0	4,7	3,3	2,8	2,2	1,71	1,4	1,15	1,0	0,8	0,66	0,56	0,49	0,43	0,38
1,4	Q	26,35	41,3	59,3	105,5	165,0	302	422	660	1032	1473	2020	2635	4140	5920	8090	10530	13370	16500
	h	15,4	11,9	9,6	6,9	5,4	3,8	3,2	2,5	2,0	1,6	1,3	1,17	0,92	0,76	0,64	0,56	0,5	0,44
1,5	Q	28,25	44,2	63,6	113,0	176,5	345	452	707	1106	1590	2165	2825	4430	6350	8660	11300	14320	17680
	h	17,4	13,5	10,9	7,8	6,1	4,4	3,6	2,8	2,25	1,82	1,5	1,34	1,05	0,87	0,74	0,64	0,57	0,51
1,6	Q	30,1	47,1	67,8	121,0	188,5	368	483	753	1180	1695	2310	3010	4730	6770	9240	12055	151270	18850
	h	19,6	15,3	12,4	8,9	6,9	4,9	4,1	3,2	2,55	2,05	1,7	1,53	1,18	0,99	0,84	0,72	0,64	0,58
1,7	Q	32,0	50,1	72,0	128,0	200,0	392	513	800	1253	1802	2455	3200	5020	7190	9820	12800	16230	20030
	h	21,9	17,2	13,9	10,0	7,8	5,4	4,6	3,6	2,85	2,3	1,95	1,7	1,33	1,11	0,94	0,81	0,73	0,65
1,8	Q	33,9	53,0	76,3	136,0	212,0	415	543	848	1327	1905	2600	3390	5320	7610	10380	13550	17200	21200
	h	24,2	19,1	15,4	11,1	8,7	6,0	5,1	4,0	3,15	2,6	2,2	1,9	1,48	1,24	1,05	0,91	0,81	0,73
1,9	Q	35,8	56,0	80,5	143,5	224,0	438	573	895	1400	2015	2740	3580	5610	8040	10960	14300	18150	22400
	h	26,8	21,0	17,0	12,3	9,6	6,8	5,6	4,4	3,45	2,85	2,45	2,1	1,64	1,38	1,17	1,01	0,9	0,81
2,0	Q	37,7	59,0	84,8	151,0	235,5	461	603	943	1475	2120	2885	3765	5910	8460	11540	15060	19100	23570
	h	29,6	23,0	18,6	13,4	10,5	7,5	6,2	4,9	3,8	3,17	2,7	2,33	1	1,52	1,3	1,12	0,99	0,89
2,1	Q	39,5	62,0	89,0	158,5	247,5	484	633	990	1548	225	3030	3955	6200	8890	12100	15810	20050	24750
	h	32,2	25,1	20,4	14,8	11,5	8,2	6,8	5,4	4,2	3,5	2,95	2,55	2,0	1,68	1,43	1,22	1,08	0,98
2,2	Q	41,5	64,9	93,2	176,0	259,0	507	663	1036	1620	2330	3175	4145	6500	9300	12700	16570	21000	25930
	h	35,0	27,3	22,3	16,2	12,5	9,1	7,4	5,9	4,6	3,85	3,25	2,8	2,2	1,85	1,56	1,34	1,18	1,08
2,3	Q	43,3	67,9	97,5	173,5	271,0	530	694	1082	1695	2440	3320	4330	6800	9730	13270	17310	21950	27100
	h	38,0	29,7	24,2	17,7	13,6	9,8	8,1	6,4	5,0	4,15	3,5	3,05	2,4	2,03	1,7	1,46	1,28	1,18
2,4	Q	45,2	70,8	101,5	181,0	282,5	553	724	1130	1770	2545	3460	4520	7090	10140	13850	18090	22900	28300
	h	42,1	32,1	26,2	19,1	14,7	10,6	8,8	6,9	5,45	4,55	3,8	3,3	2,62	2,21	1,85	1,58	1,38	1,28
2,5	Q	47,1	73,7	105,8	189,0	294,5	576	755	1178	1843	2650	3610	4710	7390	10570	14420	18820	23880	29450
	h	45,0	34,7	28,3	20,5	16,0	11,4	9,6	7,5	5,9	4,9	4,1	3,58	2,84	2,4	2,0	1,7	1,5	1,4
2,6	Q	49,0	76,6	110,0	196,0	306,0	599	785	1225	1915	2755	3755	4900	7680	11000	15000	19590	24820	30630
	h	48,3	37,3	30,4	22,2	17,2	12,3	10,4	8,1	6,35	5,25	4,4	3,85	3,07	2,59	2,17	1,84	1,62	1,51
2,7	Q	50,9	79,6	114,3	204,0	318,0	622	815	1271	1990	2860	3900	5090	7980	11140	15590	20340	25800	31820
	h	51,7	40,0	32,5	23,8	18,5	13,2	11,2	8,7	6,85	5,65	4,75	4,15	3,3	2,78	2,34	1,98	1,74	1,62
2,8	Q	52,7	82,6	118,5	211,5	330,0	645	845	1320	2060	2970	4040	5280	8270	11830	16160	21090	26730	33000
	h	55,2	42,5	34,8	25,5	19,9	14,0	12,0	9,3	7,35	6,05	5,10	4,45	3,56	2,98	2,51	2,13	1,88	1,74
2,9	Q	54,6	85,5	123,0	219,0	342,0	668	875	1365	2140	3075	4190	5460	8560	12250	16730	21480	27700	34200
	h	58,7	45,1	37,1	27,1	21,3	15,2	12,8	10,0	7,85	6,45	5,5	4,75	3,82	3,18	2,7	2,3	2,03	1,87
3,0	Q	56,5	88,5	127,0	226,5	354,0	691	905	1414	2210	3180	4330	5650	8850	12690	17310	22600	28650	35350
	h	62,9	47,9	39,6	28,8	22,6	16,3	13,6	10,7	8,4	6,9	5,9	5,1	4,1	3,4	2,9	2,5	2,2	2,0

Tableau C - Pertes de charge, en cm c.a., pour chaque mètre de tuyau droit