

Le dissipateur de Carnot

Une solution flexible pour les by-pass de turbines à haute chute

Aline Choulot, Centre InfoEnergie Suisse romande pour la petite hydraulique

Toute turbine intégrée à un réseau d'eau potable ou d'eaux usées doit garantir en toute circonstance la fonctionnalité première de l'aménagement : l'approvisionnement en eau potable ou l'évacuation des eaux usées. Or, pour ces projets, il est rare de justifier financièrement l'installation de deux turbogroupes afin de maximiser la production en cas d'arrêt de l'un des 2 (pour maintenance, par exemple).

Par conséquent, chaque turbine doit être équipée d'un by-pass. Les vannes dissipatrices, souvent peu onéreuses à l'achat, peuvent être une solution. Toutefois, elles sont généralement coûteuses à l'exploitation, et, surtout, ne couvrent pas tous les cas de figure, notamment là où les chutes et les débits sont très variables. C'est là où le dissipateur de Carnot devient intéressant – voire même imparable pour les turbines à hautes chutes.

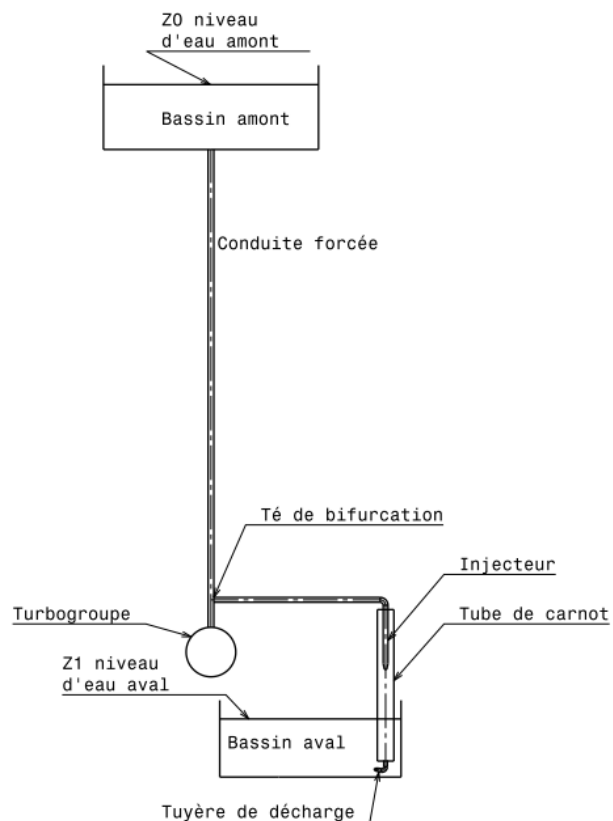


Figure 1. Schéma de principe du by-pass dissipateur de Carnot à une seule tuyère de décharge – les proportions ne sont pas respectées pour une meilleure compréhension. (Source : Mhylab)

Qu'est-ce qu'un by-pass de type dissipateur de Carnot ?

En général, par définition, un by-pass de turbine fait transiter l'eau de la conduite forcée, depuis l'amont de la turbine jusqu'au bassin aval. La particularité du dissipateur de Carnot est d'être composé d'un **injecteur** qui, de manière **similaire aux turbines Pelton**, forme un **jet à grande vitesse**. Ce jet pénètre dans un tube complètement rempli d'eau sous pression, appelé tube de Carnot. Et, comme pour la turbine, cet injecteur permettra de réguler les débits en jouant sur la course de son pointeau. Il sera ainsi asservi de manière similaire à la turbine, par exemple, au niveau d'eau dans le bassin de mise en charge de la conduite forcée.

Bilan énergétique

L'énergie de base à dissiper est équivalente à une énergie massique, qui est fonction de la **différence d'altitude** entre le niveau d'eau dans le bassin de mise en charge de la conduite forcée (Z0) et celui dans le bassin aval dans lequel le by-pass restitue l'eau (Z1) (cf. Figure 1).

Dans un aménagement équipé d'un by-pass dissipateur de Carnot, cette **énergie** va se **dissiper sous différentes formes** :

- Par frottement ou perte de charge dans la conduite forcée et la tuyauterie du by-pass (tubes, coudes, cônes, ...) en amont et en aval du tube de Carnot,
- Sous forme d'énergie cinétique par dissipation du jet de l'injecteur dans le tube de Carnot,
- Sous forme d'énergie cinétique à la sortie du by-pass, par un jet crachant dans le bassin aval.

Ce bilan énergétique répond à **l'équation de Bernoulli** qui énonce que, pour un écoulement incompressible, en régime permanent, pour lequel les effets visqueux sont négligeables et en négligeant les transferts de chaleur, la somme des énergies est une constante sur une ligne de courant.

Le phénomène de cavitation

Outre ces notions de bilan énergétique, un **phénomène important** est à prendre en compte : celui de la **cavitation**. Pour rappel, la cavitation est issue du passage de l'état liquide à l'état vapeur à température constante par une diminution de la pression, qui devient inférieure à celle de vapeur saturante, conformément au diagramme du point triple de l'eau (cf. Figure 2). La génération d'une **bulle de vapeur** est suivie par son **implosion**, provoquée par un retour rapide à une pression supérieure à celle de vapeur saturante, et suffisante pour effectuer la transition de la phase vapeur à la phase liquide. Les densités d'énergie sont à ce point importantes que si ladite bulle se trouve à proximité d'une paroi solide, ce phénomène provoquera un **arrachement de matière**. L'implosion doit donc rester éloignée des parois métalliques intérieures du tube de Carnot, celles-ci pouvant être érodées si l'ensemble du by-pass n'a pas été correctement dimensionné.

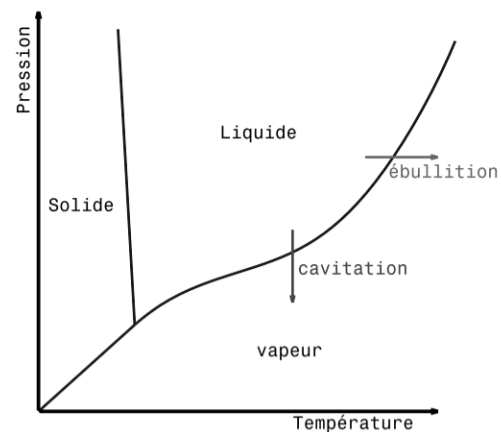


Figure 2. Diagramme du point triple de l'eau

Le dimensionnement : un processus itératif

Le dimensionnement d'un by-pass dissipateur de Carnot est un **processus itératif** qui doit répondre aux principes suivants.

1. Maximisation de la perte de charge dans la tuyauterie du by-pass, tout en assurant une vitesse d'écoulement adaptée à l'aménagement

La tuyauterie du by-pass se compose des tubes, coudes et autres cônes qui permettront d'acheminer l'eau de la conduite forcée jusqu'au bassin aval en passant par l'injecteur du by-pass et le tube de Carnot. L'idée est de **maximiser la perte de charge** de cette tuyauterie, ce qui implique de choisir les diamètres de tube les plus petits. A noter que ceci va également dans le sens de réduire les coûts de l'équipement. Toutefois, on sera attentif à ce que la vitesse maximale de transit ne soit pas supérieure à 15 m/s, pour garantir à l'installation une tenue à long terme.

2. Vitesse de sortie du by-pass adaptée aux dimensions du bassin aval

Le principe est de **maximiser la vitesse de sortie** du jet dans le bassin aval. Toutefois, il convient de s'assurer que ce jet ne conduit pas à l'érosion du mur qui lui fait face. De plus, mieux vaut éviter de créer une vague dans le bassin aval.

3. Absence de cavitation dans le tube de Carnot

Lors du dimensionnement, il s'agira de calculer la pression dans le tube de Carnot, en utilisant l'équation de Bernoulli, puis de contrôler que cette pression est supérieure à celle identifiée comme entraînant une cavitation dommageable.

Ces principes sont à appliquer sur toute la plage de débits pour lequel le by-pass est tenu de fonctionner et par conséquent, sur toute la plage de chute correspondante. Si les itérations sur le dimensionnement effectuées sur les longueurs de la tuyauterie, son diamètre interne ou la vitesse de sortie ne convergent pas vers un fonctionnement sans cavitation, **deux solutions sont possibles** : réduire la plage de fonctionnement ou ajouter une ou plusieurs sorties au by-pass, comme explicité ci-après.

Plusieurs tuyères en aval pour augmenter la plage de fonctionnement

Lorsque le by-pass dissipateur de Carnot classique ne permet pas d'assurer un fonctionnement sans cavitation sur toute la plage de débit et de chute requise, une solution est de concevoir **plusieurs sorties**, appelées tuyères, pour le by-pass.

Ainsi, chaque tuyère comprendra **un tube raccordé au tube de Carnot** et une vanne en tout ou rien. Pour des questions pratiques, ces vannes se trouveront, si possible, en dehors du bassin aval.

Le travail du concepteur du by-pass sera alors de déterminer, sur toute la plage de débit transitant dans la conduite et nécessaire au réseau d'eau, les **séquences d'ouverture** de ces vannes.

Le dissipateur de Carnot de SITSE¹ : un exemple de by-pass sous haut débit

La station d'épuration de Terre sainte dans les hauts de Coppet (VD), mise en service en 2014, génère des eaux traitées qui sont turbinées avant d'être rejetées au lac Léman. Contrairement à la turbine, dimensionnée, conformément à la courbe des débits classés, pour un débit de 170 l/s, son **by-pass est capable d'évacuer le débit maximal** de la STEP de 320 l/s. Ainsi, le by-pass peut fonctionner quand la turbine est à l'arrêt, mais également lorsque la turbine est à pleine charge et que le débit sortant de la STEP est supérieur à 170 l/s (débits de pointe). Pour couvrir cette large plage de débits et les plages de chute correspondante (la dénivellation est de 83 m), la solution de **3 tuyères en sortie de tube de Carnot** a été retenue, dont la plus petite est toujours ouverte.

Cf. Figure 3, Figure 4, Figure 5 et Figure 6

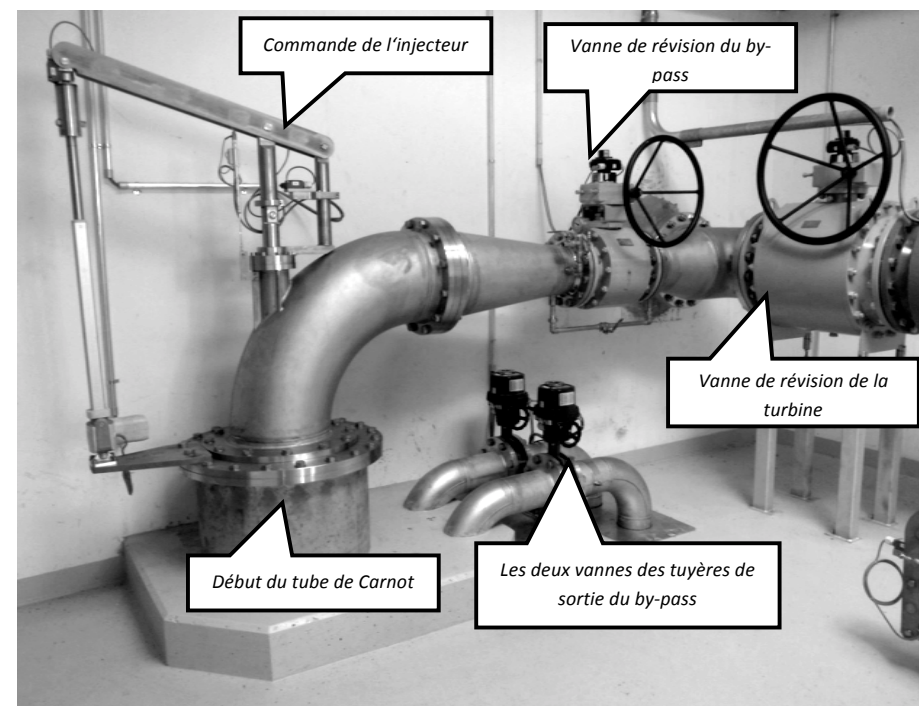


Figure 3. Le by-pass du turbogroupe de SITSE, à Coppet (VD), sur les eaux usées traitées de la région de Terre Sainte ($Q = 320$ l/s, $\Delta Z = 83$ m, constructeur : Telsa SA & Jacquier-Luisier SA) (Source : Mhylab)

¹ Services industriels de Terre Sainte et Environs



Figure 4. Vue 3D de principe de l'implantation du turbogroupe et du dissipateur de Carnot équipé de 3 tuyères de décharge dans le local de turbinage de SITSE (Source : Mhylab)



Figure 5. Le by-pass du turbogroupe de SITSE au niveau du réservoir aval (vidé): la fin du tube de Carnot, le départ des 3 tuyères dont la plus petite, toujours ouverte (Source : Mhylab)



Figure 6. Le by-pass du turbogroupe de SITSE dans le réservoir aval (vidé): le tube de Carnot, les deux tubes des tuyères et les 2 tuyères équipées de vanne (Source : Mhylab)

Le dissipateur de Carnot de Fang : un exemple de by-pass sous très haute chute

Afin d'estimer le potentiel de turbinage de son réseau d'eau potable au niveau du village de Fang et de préciser les données nécessaires à la conception d'une future turbine, la **commune d'Anniviers (VS)** doit réaliser des mesures de débits. Cette opération entraînant la mise en charge de la conduite alimentant le réservoir de Fang à 1095 m d'altitude depuis une chambre de mise en charge située à 1715 m d'altitude, il est nécessaire de dissiper l'énergie potentielle due à cette **colonne d'eau de 620 m**. Le choix a été fait d'installer un dissipateur de Carnot. Conçu pour travailler sur une plage de débit variant de **1 à 50 l/s** (débit maximum déterminé sur la base de la capacité estimée des sources et de la perte de charge théorique maximale acceptable avec la conduite en place), pour une chute nette théorique en amont de l'injecteur du by-pass variant de 500 à 620 m. Le tube de Carnot est équipé de **3 tuyères, de diamètre différent**, chacune équipée d'une vanne.

L'installation a été mise en service en été 2015. **Au moins une année de mesure des débits** devra être réalisée avant de déterminer le débit nominal optimal et la chute nette réelle de la future turbine qui exploitera la dénivellation de 620 m et débitera également dans le réservoir de Fang. Une fois la turbine en service, le dissipateur de Carnot n'en deviendra pas obsolète pour autant. Vu la flexibilité de son dimensionnement, il servira alors de by-pass de la turbine.

Cf. Figure 7, Figure 8, Figure 9 et Figure 10

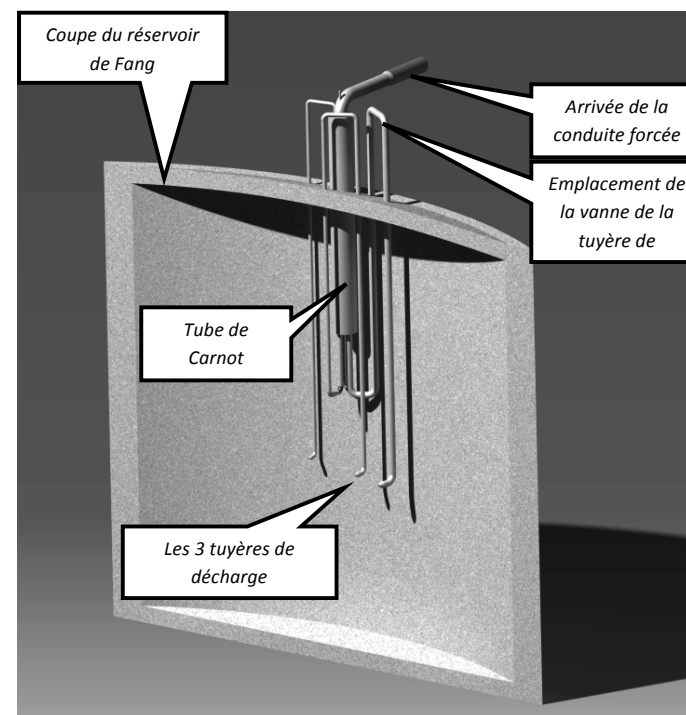


Figure 7. Schéma d'installation du by-pass de Fang équipé de 3 tuyères de sortie, installé dans le réservoir de Fang ($Q = 43 \text{ l/s}$, $\Delta Z = 620 \text{ m}$, constructeur : Cerec Engineering) commune d'Anniviers (VS) (Source : Mhylab)

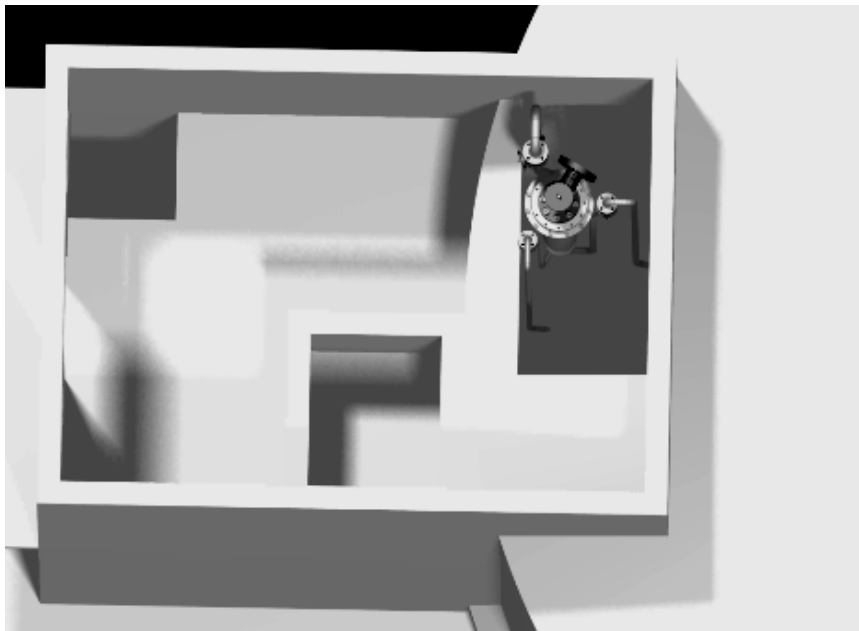


Figure 8. Etude de l'implantation du by-pass sur le réservoir de Fang, vue de dessus (Source : Cerec Engineering)

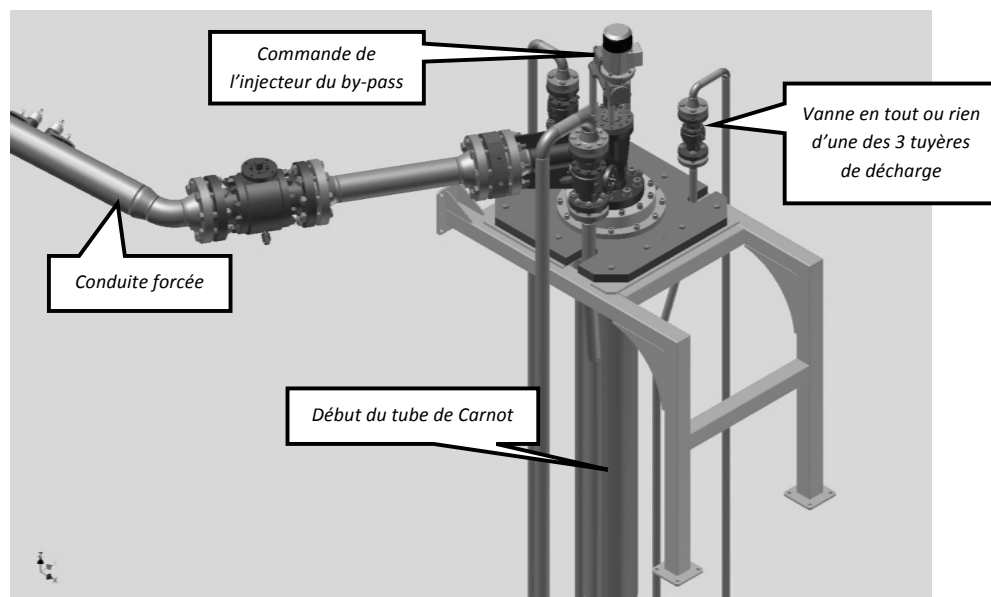


Figure 9. Vue 3D de la conception mécanique du by-pass de Fang équipé de 3 tuyères de sortie (Source : Cerec Engineering)



Figure 10. Le réservoir de Fang en septembre 2015, complètement enterré, avec à gauche le petit local qui donne accès au débitmètre et à la vanne de révision du dissipateur de Carnot (Source : Cerec Engineering)

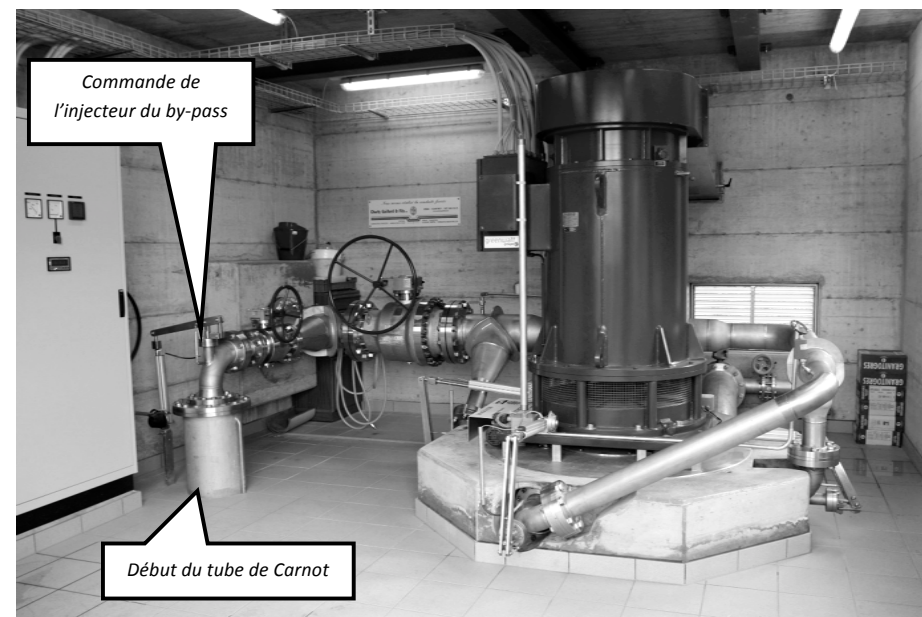


Figure 11. Le turbogroupe d'Arbaz (180 l/s, 358 m, 530 kW) et son by-pass à une seule tuyère ($Q=80$ l/s, $\Delta Z=417$ m, constructeur: Gasa Hydro SA), intégrés au réseau d'eau potable de la commune d'Arbaz VS (Source : R. Chenal)

Pour en savoir plus:

Aline Choulot, Centre InfoEnergie Suisse romande pour la petite hydraulique
 c/o Mhylab
 Chemin du Bois Jolens 6
 1354 Montcherand - Suisse
 Tél : + 41 24 442 86 24
romandie@smallhydro.ch
www.petitehydraulique.ch