Les groupes pour petites centrales de production de (1 000 à 8 000 kW)

Sets for small hydroelectric plants (1,000 to 8,000 kW)

J. Rabaud

EDF, Paris

G. Picollier

Neypic, Grenoble

Le marché

Comme on a pu le constater, le marché des petites turbines subit un regain d'animation ces dernières années. Les demandes sont nombreuses sans pour autant déboucher, dans l'immédiat, sur de véritables appels d'offres. Les consultations proviennent aussi bien de clients nationaux qu'internationaux, de pays développés que de pays peu équipés sur le plan de l'énergie électrique. Rappelons que les conditions d'équipement en France sont soumises à des règles administratives différentes selon que la puissance totale brute installée est inférieure ou supérieure à 4 500 kW. En outre, la loi de nationalisation limite à 8 000 kVA la puissance des installations pouvant être réalisées en dehors d'EDF. Dans le premier cas, l'autorisation est accordée par arrêté préfectoral et la durée de l'instruction du dossier est de l'ordre d'un an, sauf complication lors de l'étude d'impact. Dans le deuxième cas, si la puissance est supérieure à 4 500 kW, la concession est accordée par décret en Conseil d'Etat et la durée de l'instruction est de l'ordre de trois ans. Cette différence dans les délais permet, en particulier au constructeur, de situer les projets dans le temps et de choisir ceux qu'il juge les plus sérieux dans l'immédiat. Au-delà de 8 000 kVA seule EDF peut équiper.

A l'étranger, cette distinction ne joue plus, les conditions d'équipement, spécifiques à chaque pays, sont plus difficiles à apprécier. La limite de 8 MVA n'est d'ailleurs pas nécessairement applicable pour la définition des petites centrales.

Le marché peut aussi se diviser, qu'il soit français ou étranger, en fonction de la clientèle. Le secteur public est, bien entendu, le plus structuré et le plus exigeant sur le plan de la qualité. Les clients privés, généralement des sociétés créées dans le but de tirer profit de leur installation, sont en général plus axés sur l'aspect coût de l'investissement. C'est principalement pour elles

que les constructeurs devront concevoir des solutions nouvelles qui n'ont pas encore forcément "fait leurs preuves" mais qui leur permettront de mieux se placer sur le marché de la concurrence internationale. Du point de vue site, les turbines d'une puissance de quelques MW se placent rarement en remplacement de machines, type vieux moulins, elles sont fréquemment prévues pour compléter l'équipement d'une retenue déjà existante.

Exigences du client

Etude de la rentabilité

Envisager d'installer une unité de 1 à 8 MW implique que le client a dépassé le statut de simple auto-producteur voulant satisfaire ses besoins domestiques ou artisanaux pour atteindre celui de producteur autonome agissant en investisseur. Il est donc nécessaire qu'il ait une bonne idée de la rentabilité de l'argent engagé dans l'opération.

Cette rentabilité dépend de deux éléments fondamentaux : le coût de l'installation et l'énergie produite, en quantité et en qualité.

Le prix de l'installation doit être estimé avec précision ; il dépend essentiellement des conditions géographiques et géologiques du site qu'il faut apprécier sans erreur. La valeur de l'énergie produite dépend, bien évidemment, des paramètres du site : hauteur de chute et débit équipables. Or, contrairement à ce que beaucoup pensent, le débit des rivières n'est en général pas bien connu et il convient de l'approcher avec une durée d'observation statistiquement suffisante, tant en ce qui concerne ses valeurs moyennes que ses évolutions dans l'année.

Dans le cas particulier d'EDF, considérée ici en

tant que producteur, les études de rentabilité sont souvent influencées, soit par le fait que l'on envisage l'aménagement d'une série de chutes, soit par le fait que l'équipement d'un nouveau site rentabilise une chute existante ou est rentabilisé par celle-ci.

Assurance de la garantie de production

Aucune garantie totale n'existe en ce domaine ; les espérances du producteur doivent être surtout basées sur la confiance qu'il a dans les constructeurs. Peut-être est-il intéressant d'indiquer ici les idées directrices qui guident à ce sujet le Service de la Production Hydrauliques d'EDF :

La première est que, contrairement à ce qui se passe pour les grosses unités de production (où les cahiers des charges précisent de nombreux points particuliers, techniques ou technologiques), les machines de petites tailles sont commandées avec des clauses techniques réduites, qui indiquent plus des performances globales à respecter que des moyens préconisés pour les obtenir.

Mais, il faut insister sur deux autres idées directrices importantes :

- en se basant sur une expérience portant sur 1 500 groupes de toutes puissances, ce Service attache beaucoup plus de prix aux solutions sûres et éprouvées qu'aux recherches de solutions nouvelles — aussi séduisantes soient-elles — pour résoudre des problèmes dont une bonne solution existe déjà.
- les consultations ne sont lancées — et a fortiori les commandes ne sont passées — qu'après de constructeurs jugés techniquement aptes à répondre correctement dans la gamme de puissance considérée.

Automaticité — Entretien — Surveillance — Disponibilité

Le raccordement au réseau EDF implique un certain nombre de protections et d'automatismes sur lesquels il n'y a pas lieu d'insister ici.

D'autre part, il convient de garder en mémoire le fait que le tarif d'achat de l'énergie par EDF est d'autant plus intéressant que l'énergie est produite en périodes de forte consommation et que la puissance garantie est élevée. Ce tarif est également plus intéressant pour le producteur si l'implantation de l'usine de production et sa puissance lui permettent de livrer directement son énergie sur le réseau de distribution.

De cela découlent des contraintes d'entretien et de surveillance qui dépendent trop de circonstances particulières pour que l'on puisse les généraliser.

Le producteur EDF a automatisé toutes les usines de la plage de puissance que nous décrivons. La surveillance couvre des groupements de plusieurs usines et l'entretien est préventif et préparé.

Remarques

Qu'il soit enfin permis d'insister encore sur les erreurs souvent faites à cause d'une mauvaise connaissance des débits. Une possibilité de crue sous-estimée peut entraîner la destruction rapide de tout ou partie de l'installation. Un débit moyen surestimé conduit à une mauvaise rentabilisation des immobilisations.

Tâches du constructeur

Face à la diversité de la clientèle, le constructeur devra réagir en s'adaptant cas par cas, à moins qu'il ne limite ses ambitions à une gamme de produits standardisés.

En règle générale, les délais de réponse aux consultations sont extrêmement courts. Les prix d'ordre sont souvent donnés dans la journée ou les jours qui suivent la demande.

La tâche à accomplir dépend des exigences du client ou de son ingénieur-conseil. Le non-spécialiste se contentera du prix de la machine en retour des données élémentaires, comme la chute et le débit moyen. Le client organisé exigera une réponse aux spécifications financières et techniques dont le volume peut être comparable à celui d'une installation de plusieurs dizaines de MW, principalement à l'exportation.

Etant donné l'importance relativement modeste de ces petites centrales la fourniture demandée ne se limitera pas seulement à la turbine, mais inclura éventuellement les organes de garde, la conduite forcée, la génératrice, le matériel électrique, etc.

Le constructeur du matériel hydromécanique pourra donc, à l'occasion, jouer le rôle d'ensemblier. Notons que le Génie Civil est toujours exclu de la fourniture.

Quelles sont les qualités et moyens du fournisseur pour répondre à ce marché de petites ou moyennes turbines ?

Tout d'abord, réagir vite et s'adapter à la demande, ce qui nécessite pour la grosse entreprise de sortir des circuits relativement lourds des constructions traditionnelles.

L'informatique aidera le projeteur et le Service Devis pour définir rapidement les dimensions principales, le poids et le prix de la machine.

Les analogies, l'expérience et le savoir-faire du constructeur devront plus que jamais être mis à contribution.

Sur le plan réalisation, les lignes directrices peuvent être les suivantes :

- répartir les études sur plusieurs affaires semblables ou voisines, utiliser des analogies ;
- revoir et simplifier la conception : tracés hydrauliques, mécanique matériaux, montage, contrôle ;
- utiliser des composants du commerce ;
- faire appel à la sous-traitance pour les fabrications classiques et conserver la réalisation des parties nobles.

Nous allons détailler ces différents aspects dans les chapitres suivants.

Choix des machines en fonction de la chute (Fig. 1)

Dans ce chapitre, nous allons examiner les différentes possibilités qui s'offrent au maître d'œuvre pour réaliser un projet d'installation hydraulique tout en recherchant les aspects économiques du Génie Civil et de l'électro-mécanique.

Il semble que l'on puisse classer la complexité des installations par ordre décroissant en fonction de la chute, les Pelton étant les plus rustiques, et les basses chutes offrant une très grande diversité de solutions.

Figure 1 — Abaque du choix des machines.

Nous commencerons donc par les très hautes chutes pour dire qu'il y a peu d'espoir et peu de besoin de bouleverser la conception et la réalisation du Génie Civil des installations équipées de turbines Pelton. Le coût global est surtout fonction de l'importance de la conduite forcée.

Il faut distinguer les basses chutes des chutes moyennes et hautes. Nous verrons plus loin que cette distinction joue énormément sur la possibilité de normalisation des machines, donc sur leur coût. La limite supérieure des basses chutes peut être fixée à 20 m.

Les machines concernées dans le présent exposé ont, pour les hautes chutes, des puissances suffisamment importantes pour que chaque installation soit étudiée de façon spécifique pour être adaptée au site.

La transition entre haute et moyenne chute pose le dilemme Francis-Pelton.

La décision sera conditionnée, tout d'abord, par les variations de débit envisagées pour la turbine. L'analyse de la courbe de débits classés et le calcul de productibilité indiqueront s'il est intéressant de prévoir ou non un rapport important entre le débit maximum et le débit minimum de fonctionnement. Lorsqu'on dépasse 2 et, à moins de prévoir deux groupes dont l'un peut être arrêté en période d'étiage, il est préférable de s'orienter vers une solution Pelton. Ces machines sont, en général, équipées de deux jets, ce qui peut permettre

des variations de débit de 1 à 10, tout en conservant de bons rendements et un fonctionnement mécanique correct de la machine.

Le choix du débit d'équipement étant fait, tout au moins provisoirement, la turbine à réaction peut être envisagée si, comme nous l'avons dit, les variations de débit demandées ne sont pas trop importantes. L'avantage de la turbine à réaction apparaît alors avec un encombrement plus réduit et surtout une vitesse de rotation plus élevée que pour la Pelton. On gagne, ainsi, sur le coût de la turbine et sur celui de l'alternateur.

Si nous restons, maintenant, dans le domaine propre aux turbines Francis, le choix peut encore être fait entre la Francis simple et la Francis double. La Francis double permettra de gagner un rapport $\sqrt{2}$ sur les vitesses, mais le léger gain sur la génératrice ne compense pas obligatoirement la plus grande complexité de la machine et un génie civil plus important, principalement à cause des deux aspirateurs ou des deux aménées et de la plus grande longueur d'arbre. La vitesse spécifique et la gamme de tracés du constructeur conditionneront le choix de la Francis double qui sera une machine difficile à normaliser. Noter toutefois une sous-estimation quasi-systématique au niveau des projets, des performances des Francis doubles.

Le problème se complique quant au choix lorsqu'on atteint le domaine des basses chutes avec les turbines Kaplan ou les groupes axiaux. Sans entrer dans le détail des types de machines, nous citerons l'éventail des dispositions et conceptions possibles :

— position de l'axe :

- vertical, horizontal, incliné,
- alimentation en chambre ouverte, chambre d'eau,
- bâche spirale.

Le distributeur peut être mobile, mais pour des raisons de prix s'oriente de plus en plus vers le distributeur fixe qui permet de très bonnes performances.

Les pales peuvent être, elles aussi, fixes ou mobiles ; on peut prévoir des pales orientables à l'arrêt.

Souvent, ces groupes de vitesse spécifique élevée sont couplés aux génératrices par l'intermédiaire d'un multiplicateur, dont les axes primaires et secondaires peuvent être parallèles ou perpendiculaires intégrés à la turbine ou extérieurs.

Un nouveau choix devra être fait entre la Kaplan classique, le groupe bulbe, le coude amont ou aval.

Parmi les solutions qui vont dans le sens de la simplification, il convient de citer les groupes du type Harza, à roues polaires, c'est-à-dire dont le rotor du générateur est porté par la ceinture de la roue. Ces groupes sont destinés à des basses ou très basses chutes. Plusieurs, à pales fixes, sont exploités en Allemagne et en Belgique. Le premier groupe à pales mobiles du type Straflo est en cours de construction.

Dans le domaine peu étendu des chutes de 4 m à 20 m, il a été possible de concevoir un type de machine normalisée permettant d'adapter le site aux turbines et non les turbines au site.

Citons comme exemple les micro-bulbes à renvoi d'angle avec génératrice extérieure dont les diamètres de roues normalisées conditionnent les dimensions et le prix de la machine (Fig. 2).

Figure 2 — Micro-bulbes à renvoi d'angle Neyrpic.

Simplifications

Technologie

Le type de machine choisi, examinons les voies et les moyens à la disposition du constructeur pour concevoir et réaliser un groupe turbo-générateur au meilleur coût.

On peut supposer le problème résolu pour les groupes normalisés dont la conception a été arrêtée après une analyse de la valeur des différentes composantes et confirmation par l'expérience des fabrications.

La normalisation et l'effet de série sont plus difficiles à obtenir pour les installations de moyennes et hautes chutes où la turbine devra s'adapter aux caractéristiques du site à équiper.

L'histoire des projets montre qu'il est assez rare de pouvoir proposer des machines homothétiques et encore moins identiques dans un intervalle de quelques années. Il est, par contre, possible de considérer la turbine comme un assemblage de sous-ensembles fonctionnels, chacun d'eux pouvant être étudié et conçu dans une optique de standardisation.

Nous ne citerons que quelques idées, l'éventail des solutions étant largement ouvert à l'imagination du projecteur.

La première démarche consiste à analyser ce qui différencie les machines de petites puissances des grosses unités. Tout d'abord les dimensions et le poids permettront très souvent de réaliser un montage total ou partiel en atelier. La maintenance pourra être assurée en démontant tout ou partie de la machine, d'où une conception particulière possible des fixations au béton.

Une autre idée générale à retenir est liée à la possibilité de laisser partir ces groupes à l'emballage, la résistance mécanique des génératrices le permettant, malgré les vitesses élevées. Cette possibilité simplifie les problèmes relatifs à la surpression et aura, donc, des conséquences avantageuses sur l'installation générale et la régulation. Il conviendra, néanmoins, de s'assurer du niveau de la surpression, dite naturelle des roues coupant leur débit à l'emballage.

En ce qui concerne la ligne d'arbre, les solutions doivent être étudiées en accord avec l'électricien. Un groupe horizontal peut être conçu avec, au total, 2,

3 ou 4 paliers, l'un d'eux faisant butée. Il semble, a priori, que la suppression d'un ou de deux paliers conduise à une solution économique. C'est en général le cas, mais encore faut-il s'assurer que la suppression ou la modification d'un palier de la génératrice et l'allongement de son arbre ne fassent pas augmenter le prix d'une fourniture qui ne serait plus sur catalogue.

Le choix du type de palier est, bien entendu, fonction des charges, du diamètre de l'arbre et de la vitesse de rotation. L'emploi du roulement est, sans aucun doute, la solution la plus économique mais, pour ces petites machines, on trouve dans le commerce des paliers standards répondant aux exigences de qualité et de fiabilité imposées.

Une remise en cause des matériaux traditionnels montre qu'il existe des solutions économiques tout aussi fiables permettant d'utiliser les matières plastiques, le caoutchouc, le bronze et la fonte.

Sans nuire à la qualité, le contrôle, lui-même, devra être allégé et n'utiliser que des procédés simples, par exemple, un ressuage sur la pièce terminée d'usinage. Il est parfois préférable de recouler une pièce moulée plutôt que de la réparer, la réparation et les contrôles coûtant plus cher que la pièce finie.

Eviter les redondances chez le fournisseur, le constructeur et le client. Réduire le nombre de documents, fiches et procès verbaux et leurs circuits administratifs complexes.

Il faudra retrouver, s'il n'existe déjà, l'esprit petite entreprise dans les ateliers et adapter les machines-outils aux fabrications. La responsabilité d'une réalisation peut être laissée en totalité à une même équipe et, ainsi, donner plus d'intérêt au travail.

Rendements

Il existe de nombreuses façons de gaspiller l'énergie disponible d'un site : dans l'amenée, la turbine elle-même et son évacuation, la répartition des pertes étant différente suivant la chute équipée ; conduite forcée prépondérante pour les hautes chutes, aspirateur pour les basses chutes. Mais, la performance de l'installation doit être appréciée globalement par la production annuelle capable de rentabiliser l'investissement.

On demandera principalement à la turbine de fournir la puissance prévue, seul élément de rapport, avec d'autant moins d'inquiétude pour le rendement que la puissance est faible. Nous voyons plusieurs raisons à cela. Le choix du débit d'équipement conditionne la puissance disponible, les dimensions de la machine, donc son prix. Le cas limite est représenté par la machine sans organe de réglage dans laquelle la puissance excédentaire est consommée dans des résistances ou un frein à courants Foucault. Cette solution n'est évidemment employée que pour les faibles puissances.

On peut donc avoir intérêt à perdre un peu sur l'hydraulique pour gagner en rusticité.

Régulation

La part du poste régulation est en proportion d'autant plus importante que la puissance de l'installation est faible.

En effet, pour un type de réglage donné, cette part est presque une constante. On a donc intérêt à simplifier la régulation et à ne conserver que les fonctions strictement indispensables, telles que le démarrage, l'arrêt, les sécurités. Le type de réglage est fonction du réseau. En général, les groupes, dont nous parlons, sont connectés à un réseau important et le réglage de fréquence n'est pas nécessaire. Si l'on dispose d'une retenue il peut être intéressant de moduler la production et d'installer une régulation de niveau. La génératrice est, en général, asynchrone. Lorsque le groupe comporte un organe de réglage, distributeur ou pales, la solution la plus utilisée est l'asservissement de l'ouverture de cet organe au débit, c'est-à-dire généralement au niveau du plan d'eau amont. Les ordres peuvent alors être donnés sous forme d'impulsions et le réglage est discontinu.

Quelques exemples

Pour illustrer ces quelques réflexions sur la réalisation d'installations de petite puissance, nous présentons trois types de machines récentes, en fonctionnement, en étude ou en projet :

En Pelton

Figure 3 — La turbine de Lapes installée par Neyrpic pour la SNCF dans la Centrale de Tramezaygues dans les Pyrénées. Il s'agit d'une Pelton à axe horizontal, une roue a deux jets de 3 400 kW sous 248 m, tournant à la vitesse de 500 t/min. La roue est montée en porte à faux à l'une des extrémités de l'arbre de l'alternateur et les deux paliers du groupe ont été fournis par le constructeur de l'alternateur. L'organe de garde de la turbine est un robinet sphérique à simple étanchéité.

Figure 3 — Turbine de Lapes — Centrales de Tramezaygues-Pyrénées.

Les aiguilles et les déflecteurs sont munis de servomoteurs à huile simple effet à l'ouverture. Les fermetures sont assurées par des ressorts, aidés dans le cas des aiguilles par la tendance hydraulique.

Un système copiant électronique permet de commander l'une des aiguilles à partir de l'autre choisie comme aiguille pilote. Les mouvements de l'aiguille pilote sont asservis au niveau du plan d'eau existant

dans la chambre de mise en charge. La commande est réalisée par un électro-distributeur à 3 positions fonctionnant par impulsions.

La roue pèse 1 600 kg et est réalisée en acier inoxydable 17/4. Précisons que pour ces machines, la roue représente environ le 1/3 du prix de la turbine. Le bâti est en tôle soudée.

Figure 4 — Une Pelton horizontale de 1,5 MW sous 380 m, 750 t/min, réalisée par la Société Boussant pour un producteur autonome.

En Francis

Figure 5 — Exemple de centrale ancienne appartenant à un producteur autonome et équipée de turbines Francis Neyrpic de 4,5 MW sous 144 m en fonctionnement depuis 1917. La rénovation de l'installation est actuellement à l'étude.

Figure 6 — Deux turbines Francis horizontales de 1,42 MW sous 46 m réalisées par la Société Bouvier pour la Centrale de Bionnay (EDF).

Figure 7 — Une Francis horizontale de 2,2 MW sous 114 m de la Société Dumont pour la Centrale du Baous (EDF).

Figure 8 — Projet de Montrigon sur l'Isère pour EDF dont les études sont en cours chez Neyrpic. Les caractéristiques sont les suivantes :

— puissance nominale	4,3 MW
— chute nette nominale	20 m (19 m à 24 m)
— vitesse de rotation	187,5 t/min.

La galerie d'amenée est constituée par deux conduites en béton enterrées d'une longueur de 750 m.

L'ouvrage ne comporte pas de cheminée d'équilibre.

La retenue a un volume utile de 600 000 m³.

Les groupes sont équipés d'alternateurs et transformateurs de 5,75 MVA chacun. L'énergie est évacuée vers le poste en 63 kV.

La roue est prévue en acier inoxydable avec démontage par dessous.

Le palier est à cuve tournante avec coussinets "anti-frictionnés".

Le joint d'arbre est du type joint à fuite.

Le pivot est situé sur le croisillon supérieur de l'alternateur. Bien que la conception de ces groupes soit relativement classique, les conditions de régulation les rapprochent des petites unités. En effet, les turbines étant alimentées par deux longues conduites et l'aménagement ne comportant pas de cheminée d'équilibre, le temps de fermeture du distributeur est établi pour respecter des conditions de pression maximale, c'est-à-dire 5 bars soit 115 % de la hauteur de chute brute maximale. Les turbines partiront donc systématiquement (380 t/min.) à chaque déclenchement. Le démarrage et l'arrêt se font par des opérations enchaînées automatiques.

Figure 9 — Projet de Francis à axe horizontal réalisé par Neyrpic pour un producteur autonome. La puissance est de 2 MW et la chute maximum de 43,5 m.

La turbine est accouplée directement à une génératrice asynchrone tournant à 600 t/min.

Le groupe est alimenté par une conduite forcée de 60 m de longueur.

Figure 9 – Francis horizontale réalisée par Neyrpic.

Figure 10 – La Roche Bat l'Aigue – 4 Kaplan horizontales Dumont.

Figure 11 et 12 – Les trois groupes de l'Age – Construction Neyrpic.

En Kaplan

Figure 10 — Site de la Roche Bat L'Aigue : équipement réalisé pour EDF, par la Société Dumont, composé de 4 Kaplan horizontales de 2 MW sous 11 m avec multiplicateur.

Figures 11 et 12 — Les trois groupes de l'Age (Neyrpic pour EDF) en fin de construction en usine, sont des groupes axiaux, distributeur fixe et pales mobiles dans un conduit en S, dit coude amont, la génératrice étant située à l'amont de la roue.

La puissance unitaire est de 2,8 MW sous 19,5 m avec un diamètre de roue de 1 500 mm.

Le conduit en S peut avoir son plan vertical, horizontal ou incliné comme dans le cas présent.

Conclusion

La conception, la fabrication et la vente de turbines hydrauliques de petites et moyennes puissances exigent des responsables une maîtrise de l'ensemble des pro-

blèmes d'hydraulique générale des conduits, d'hydraulique des turbo-machines, de l'électromécanique, de la régulation et des aspects économiques.

Les firmes ayant un potentiel technique élevé peuvent faire bénéficier les équipes de constructeurs plus modestes et les clients de leurs connaissances, mais il n'en reste pas moins que la réalisation de ces petits équipements est un vrai métier de spécialiste.

En effet, petites ou grosses, les turbines doivent rester très fiables et conserver les qualités fondamentales de la machine hydraulique :

- la souplesse d'exploitation ;
- le coût d'entretien réduit ;
- la longue durée de vie.

Actuellement, les constructeurs s'attaquent à l'amélioration de la rentabilité de ces machines en étudiant une technologie spécifique, en essayant d'en standardiser certains types et en utilisant des composants fabriqués par des firmes spécialisées.

Ces recherches devraient permettre d'améliorer la rentabilité des installations même pour des puissances modestes et des chutes relativement faibles.