SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE

Comité technique — Session n° 128 — Paris — 12 et 13 juin 1985

CERTAINS ASPECTS DE L'HYDROÉLECTRICITÉ DE FAIBLE PUISSANCE
QUELQUES ÉTUDES DE CAS DE TRANSITOIRES HYDRAULIQUES

Économie et performance des petites turbines

Economy and performance of small turbines

G. Picollier

P. Girault

Département Petites centrales
Neyrpic, BP 75 Centre de tri, 38041 Grenoble Cedex

Les auteurs examinent les différents paramètres qui interviennent dans le bilan économique d'un petit aménagement hydroélectrique, en s'intéressant plus particulièrement à la turbine.

Les critères de choix sont fonction du site en tant que potentiel de production et de consommation. L'optimisation du rapport coût/productible est un compromis où intervient la technicité, la qualité, le délai, la fiabilité, le service.

Lorsque les puissances sont faibles, la rentabilité de certaines installations n'est pas toujours assurée a priori, aussi pour des caractéristiques hydrauliques identiques, le constructeur est-il amené à proposer une machine plus ou moins simple, plus ou moins performante selon la finalité du projet.

The authors examine the parameters involved in the economic balance of a small hydroelectric plant, focusing particularly on the turbine.

The selection criteria depend on the site as power generation and consumption potential. Optimization of the cost/generation capacity ratio is a tradeoff involving technicity, quality, lead times, reliability, service.

For low powers, the efficiency of certain plants is not necessarily ensured. Therefore, for the same hydraulic characteristics, the manufacturer will propose a more or less sophisticated machine, more or less performing depending on the final aim of the project.

Grandes Chutes (Guinée). Diamètre de sortie de la roue 1 150 mm. Puissance unitaire 9 110 kW. Deux turbines Francis à axe horizontal. Roue avant finition (Document Neyrpic).

Economie et performances des petites turbines

La décision de réaliser un petit aménagement hydroélectrique est prise lorsque le besoin d'énergie est absolument impératif ou lorsque le compte prévisionnel d'exploitation fait apparaître un profit. Le service l'emporte dans le premier cas, le profit dans le deuxième.

De nombreux facteurs interviennent dans l'établissement d'un tel bilan économique. Nous examinerons en particulier dans cet exposé, ceux sur lesquels l'expérience et le savoir-faire du constructeur de la turbine exercent une influence directe.

Bilan économique

De nombreuses publications indiquent clairement tous les éléments qui doivent être pris en compte pour établir le bilan économique d'une petite centrale hydroélectrique. Nous citerons ceux-ci pour mémoire.

Au passif :

- l'achat du terrain et des droits divers;
- les études;

- tous les investissements : le génie civil y compris les voies d'accès, le matériel hydro et électromécanique, le poste de transformation, les lignes de transport, le raccordement au réseau local;
- les frais financiers : charges des emprunts et intérêts intercalaires;
- les frais généraux du maître d'œuvre;
- les frais d'exploitation comprenant les frais d'opération et d'entretien de la centrale, les charges fiscales et les provisions pour renouvellement du matériel;
- les frais divers dus à la livraison de l'énergie.

A l'actif :

La vente de la production de la centrale aux conditions de reprise de la fourniture d'énergie soit à Electricité de France, ou son équivalent étranger, soit à des consommateurs privés, constituera l'actif de l'exploitation. Dans certains projets on pourra aussi tenir compte des retombées sur l'irrigation et la régularisation des crues.

Bilan :

La connaissance de tous ces éléments inscrits au passif et à l'actif devrait permettre à l'investisseur d'établir un

compte prévisionnel d'exploitation précis. La décision d'investir pourra être prise si ce bilan fait apparaître un profit ou une économie par rapport à une solution différente (diesel, turbine à gaz, extension d'une ligne) ou même une source d'énergie déjà existante.

Une analyse plus fine devrait tenir compte de l'évolution des différents prix de vente du kilowatt-heure.

Enfin, on doit noter que pour beaucoup d'installations développées actuellement, le compte prévisionnel d'exploitation risque de faire apparaître une marge faible, voire un déficit, les sites les plus rentables étant déjà exploités. C'est alors qu'intervient l'impact du choix du type de turbine à installer. L'optimisation des puissances, rendement et productivité, peut faire évoluer ce bilan dans un sens favorable.

Par conséquent, dans bien des cas, le dialogue investisseur-constructeur de la turbine sera un élément important dès le stade du projet.

En résumé, on pourrait dire que si le choix de la turbine et son prix ont une importance relativement faible dans le calcul du passif, en revanche, sa productivité a un poids relatif d'autant plus grand dans le calcul de l'actif que la marge dégagée par le bilan est faible.

Le site

La chute et le débit sont les caractéristiques principales du site. Elles ne suffisent cependant pas pour définir une machine.

Par ailleurs, il n'existe pas dans la nature deux sites ayant les mêmes caractéristiques. Cette constatation fait évidemment obstacle à l'idée de normalisation.

Enfin, de façon générale, les petits aménagements hydroélectriques, de puissance unitaire inférieure à 15 MW, sont établis au fil de l'eau. Ce qui veut dire que l'eau non turbinée est perdue au point de vue énergétique.

Le maître d'œuvre se trouvera vraisemblablement dans l'une des situations suivantes :

Figure 1. — Abaque débit/chute (documentation Neyrpic).

Il apparaît déjà très clairement que la connaissance la plus exacte des débits et de leur variation dans le temps, ainsi que des variations de niveaux amont et aval, permettra d'effectuer le choix le plus judicieux des machines à installer. Elle sera la garantie d'un bon choix des débits à équiper et de la rentabilité générale de l'installation, d'autant plus que la prévision de rentabilité sera modeste.

En fonction des caractéristiques du site, l'abaque débit/chute (Fig. 1) permet de faire une sélection rapide de l'équipement nécessaire.

On remarquera cependant que les zones où le choix est possible entre plusieurs types de turbines sont les plus étendues. Le constructeur de la turbine pourra apporter un précieux concours dans le choix de la meilleure solution.

Choix de la turbine

Nous nous placerons dans l'une des trois situations décrites à l'item précédent.

Situation « a »

L'utilisateur désire seulement produire la puissance nécessaire à ses besoins. Le débit naturel étant très surabondant, on peut se permettre d'en prélever la part nécessaire en toute période.

Dans ce type de projet, il conviendra de porter son attention sur le coût global de l'installation plutôt que sur ses performances. Le coût du KW installé devrait être suffisant pour apprécier l'intérêt du projet.

La notion de service rendu étant alors plus importante que celle de rentabilité, les performances les plus pointues en rendement et en cavitation seront secondaires par rapport à une plus grande fiabilité de l'installation, et à une facilité maximum de maintenance.

Situation « b »

L'investisseur désire tirer la plus grande énergie possible du site. Cette situation est la plus courante. Pour les besoins de la démonstration, les débits classés sont supposés connus avec une bonne précision.

On recherchera dans cette situation :

- à optimiser l'énergie productible,
- à diminuer le coût global de l'investissement.

Dans le cas où il est envisagé d'installer plusieurs groupes, le maître d'ouvrage ou son ingénieur conseil définira les critères de fractionnement de débit qu'ils souhaitent, en fonction de l'utilisation et de la maintenance des turbines.

Exemple de fractionnement couramment utilisé :

- pour 2 machines : 1/2 1/2
1/3 2/3
- pour 3 machines : 3/8 3/8 1/4.

Généralement ce fractionnement de la puissance totale reviendra plus cher à l'investissement qu'une solution où les groupes seraient identiques. Cependant le productible d'une telle installation sera plus élevé.

Il est important de noter que les petits aménagements réalisés par les grands constructeurs bénéficient des tracés hydrauliques les plus récents, développés pour les grosses turbines. Ces tracés ont été essayés en laboratoire. Leurs performances sont donc parfaitement connues.

Aussi, pour permettre au constructeur d'offrir le tracé hydraulique qui correspond le mieux aux caractéristiques du site, il est souhaitable de lui laisser une certaine liberté dans le choix de la turbine, notamment pour ce qui concerne la vitesse.

Par exemple, pour une puissance totale installée donnée, on a pu constater plusieurs fois, qu'entre deux fractionnements de puissance déterminés, l'un par le cahier des charges, l'autre par nos soins, des gains de productivité pouvant dépasser 3 %.

Cas réel étudié : Débit d'équipement 15 m³/s — Chute 125 à 137 m

Solution A : 2 turbines différentes,

Solution B : 2 turbines identiques.

Pour ce qui concerne les turbines la solution A est 10 % plus chère que la solution B, soit environ 2 % de l'investissement global. Le gain de productivité solution A par rapport à solution B, est de 3,1 %. Le surcoût entre les deux solutions est facilement amortissable. Ce qui n'est pas toujours possible.

Situation « c »

Le coût de ce type d'installation est très élevé en regard de la puissance installée et la rentabilité extrêmement liée à la productivité valorisée. Le dialogue avec le constructeur devient alors primordial.

Le coût global de l'installation doit être le plus réduit possible, tout superflu étant prohibé. Les performances, fiabilité et rendement, doivent néanmoins garder un bon niveau.

En conclusion, il n'existe pas de solution unique pour un site donné. Le choix est fonction de l'utilisation qui sera faite de l'énergie et des conditions d'exploitation.

Le rendement des turbines

À l'origine du marché des petites turbines, on aurait pu penser que le rendement intrinsèque de la turbine aurait moins d'importance que sa fiabilité ou sa commodité de montage et démontage, sans oublier bien sûr la question du prix. En revanche, comme nous l'avons montré précédemment, le choix du nombre de machines, de leurs caractéristiques et de leur type d'exploitation importe beaucoup sur le rendement global de l'installation.

Or, de manière assez générale, il semble au contraire que le marché des petites turbines soit un terrain de concurrence aigüe sur la valeur des rendements et l'on peut se demander s'il n'existe pas quelques dangers dans cette voie, dangers que nous allons préciser maintenant.

Des chiffres parfois surprenants

Limitons-nous, pour commencer, à la catégorie des turbines Francis, on sait que les rendements optimaux de ces machines varient obligatoirement avec la vitesse spécifique. Ainsi, de part et d'autre d'une bande optimale de vitesses spécifiques centrée sur la valeur 170 (avec n en rpm, P en kW, H en m) les rendements optimaux des collines décroissent soit vers les faibles soit vers les fortes vitesses spécifiques. Par exemple, pour des turbines de diamètre de sortie 3 000 mm, les offres connues font apparaître que le rendement optimal baisse environ de 3 % entre la vitesse spécifique 170 et les vitesses spécifiques maximales.

Figure 2. — Exemple de gain de productivité obtenu par une optimisation du fractionnement de la puissance (document Neyrpic).

Figure 3

Or, si l'on considère les rendements optimaux offerts récemment sur le marché des petites centrales pour des turbines Francis dont le diamètre de sortie est de l'ordre de 1 000 mm, il apparaît que ces rendements restent remarquablement constants quelle que soit la vitesse spécifique. Il faut donc conclure, soit que les rendements optimaux offerts pour la vitesse spécifique optimale sont anormalement bas, soit que les rendements offerts pour de fortes vitesses spécifiques sont anormalement élevés... si l'on veut bien admettre qu'il est difficile pour une turbine de diamètre 1 000 mm d'obtenir des rendements supérieurs à ceux des turbines de diamètre 3 000 mm.

En avançant cette conclusion, nous n'oublions évidemment pas que chaque année peut amener des progrès dans la qualité des caractéristiques des turbines.

Les tendances des appels d'offre et leurs risques

Il serait évidemment difficile de comprendre que les constructeurs poussent avec enthousiasme les rendements vers des valeurs extrêmes, sauf si la conception même des cahiers des charges présentait dans ce sens une puissante incitation. Or c'est précisément cette tendance à la valorisation des rendements qui règne souvent sur le marché.

D'une part la comparaison des prix est très fortement pondérée par le jeu des valeurs attribuées aux différences de rendement, ce qui suppose une égalité dans la crédibilité des rendements présentés, une bonne connaissance

des moyens d'investigation du constructeur et de ses références. D'autre part les pénalités fixées en cas de non respect des valeurs garanties atteignent des sommets jamais atteints sur le marché des grandes turbines.

On pourrait croire précisément que la valeur élevée des pénalités garantit le client contre le risque économique et oblige le constructeur à rester modéré dans les valeurs offertes. Ce n'est certainement pas le cas, car la réponse à plusieurs questions n'est pas évidente :

a) Pour qu'il y ait application de pénalité, il faut qu'il y ait constat technique par mesure du rendement sur le prototype. Cette mesure aura-t-elle sûrement lieu ? ou si l'on préfère, le prix de cette mesure par rapport au prix de la turbine est-il tolérable ?

b) A supposer que la mesure du rendement soit exécutée, le paiement d'une très forte pénalité éventuelle n'est pas assuré, surtout si le risque de cette pénalité a été pris par un constructeur de taille modeste dont le prix offert était particulièrement bas. En effet, c'est finalement l'acheteur qui assume entièrement le risque économique.

On pourra aussi s'interroger sur l'utilisation qui peut être faite des incertitudes de mesures sur prototype prévues par le code CEI.

Essai sur modèle homologué

Compte tenu des considérations précédentes, il est certain que les essais sur modèle réduit en similitude représentent la meilleure des garanties pour le client, aussi bien pour les caractéristiques de cavitation, que pour celles de rendement et puissance.

Nous pensons néanmoins qu'il est déraisonnable d'imputer à un projet de petite turbine le coût de la construction d'un modèle réduit et celui d'une campagne de mesures. Cela est d'autant plus vrai que dans bien des cas cet essai est un simple contrôle. Il n'apporte rien de plus aux performances du prototype.

Nous proposons donc que cet essai soit remplacé par la prise en compte des résultats d'un essai certifié sur modèle réduit déjà homologué; cela pourrait être un essai effectué dans les laboratoires du constructeur en présence d'une personne agréée par tous, ou bien dans un laboratoire neutre. L'essai donnerait lieu à un certificat d'homologation pour le tracé hydraulique. Un risque minimal pour l'acheteur pourrait provenir de cette connaissance apportée par l'essai sur modèle réduit homologué.

Nous ajoutons simplement que dans le cas où la puissance produite ne serait pas celle annoncée, le paiement d'une pénalité, quand il sera assuré, ne produira en aucun cas l'énergie manquante.

Coût de la turbine

L'analyse du coût de la turbine n'a de véritable sens que si l'on prend en compte tous les paramètres qui le composent. Dans une première phase, l'attention du client devrait se porter sur les suivants : prix, délai, qualité.

Prix

Le prix s'exprime par un nombre. Il est donc immédiatement comparable à d'autres prix. La connaissance de

l'ensemble des prix des éléments qui composent l'aménagement, permet dans une analyse rapide, de vérifier si le projet est viable ou non.

Nous savons cependant que l'appréciation la plus exacte du prix, si elle est difficile, est absolument nécessaire. Le prix est en effet pondéré par la « qualité » du produit offert.

Figure 4

Le délai

Le délai de réalisation des petits aménagements hydroélectriques est généralement court. Le temps de fabrication, du montage et de la mise en service de la turbine est de l'ordre de 1 à 2 ans.

Ces temps, pour différents types de machines, sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Ils pourront être réduits pour des machines plus rustiques. Par contre, les exigences très sévères et pas toujours justifiées de certains cahiers des charges, prolongeront les allongements notablement.

Type de machine	Délai moyen exprimé en mois	
	Fabrication	Montage et Mise en service
Turbine type siphon	9 - 11	2 - 3
Kaplan coude amont	10 - 11	0,5 - 1
Kaplan verticale	14 - 16	4 - 6
Francis horizontale	12 - 14	1,5 - 4
Francis double	14 - 16	4 - 5
Francis verticale	13 - 15	4 - 6
Pelton horizontale	10 - 12	1 - 2

Pour les turbines normalisées NEYRPIK — chute de 3 à 20 m — il n'y a plus de montage sur le site, mais une simple mise en place. Elle s'effectue en deux jours.

Le délai de fabrication de la turbine est en fait celui de la réalisation de la roue. A titre d'exemple, les différentes opérations sont les suivantes :

- consultations des sous-traitants et choix du fondeur,
- sortie des coupes modèleur par ordinateur suivant les indications de retrait données par le fondeur,
- réalisation du modèle,
- réalisation du moule,
- coulée de la roue,
- ébarbage et contrôle santé matière,
- meulage d'ébauche,
- usinage et meulage de finition selon les gabarits hydrauliques et l'état de finition désiré.

Les opérations sont nombreuses, elles ne dépendent pas toutes du turbinier. Le choix du matériau (acier au carbone, acier inoxydable, bronze d'aluminium), la charge des ateliers du fondeur ou des sous-traitants, les contrôles demandés, la qualité du tracé hydraulique et celle de l'état de surface, les procédés de moulage influent de façon importante sur ces délais.

Le constructeur est très sensibilisé par la notion de délai. Mais si certaines procédures peuvent être simplifiées, d'autres sont absolument incompressibles. Le cahier des charges doit tenir compte de ces impératifs techniques autant que des impératifs financiers liés aux délais.

La qualité

Tout le savoir-faire et l'expérience du constructeur sont en fait résumés par le mot QUALITÉ. L'appréciation la plus exacte de la qualité par le maître d'œuvre donnera au prix sa véritable dimension.

L'analyse de la qualité portera au moins sur les paramètres suivants :

- les performances en rendement et cavitation,
- la technologie utilisée,
- les matériaux et matériels employés,
- la fabrication et les contrôles,
- la maintenance,
- l'exploitation,
- la fiabilité,
- le service après-vente.

Rendement et cavitation

Contrairement au rendement de la turbine, celui des autres éléments constitutifs d'une petite centrale — alternateur, transformateur, éventuellement multiplicateur — varie peu avec la puissance.

C'est donc bien le rendement des turbines qui influencera le plus fortement le calcul de l'actif.

Or, les pertes dans les turbines Francis et Kaplan peuvent être analysées selon plusieurs rubriques :

- pour les turbines Francis
  - cinétiques tridimensionnelles : tracé hydraulique (bâche, avant-directrices et directrices, roue, aspirateur),
  - par frottement visqueux sur les parois,

- par sillage à la sortie des avant-directrices, directrices et aubes,
- par fuites aux labyrinthes.

— pour les turbines Pelton

- cinétiques : tracé de l'auget, de l'injecteur et de l'amenée,
- par frottement,
- dans le bâti par ventilation et évacuation de l'eau.

Une bonne connaissance de l'origine de ces pertes, ainsi que de leur évolution en fonction de la vitesse spécifique, permet de choisir au mieux l'équipement et la technologie voulue : pour les turbines Francis, la méthode publiée par J. Osterwalder et L. Hippe permettra d'apprécier cette évolution.

Ces réflexions ont une conséquence directe non seulement sur le choix de la turbine mais aussi sur son prix, et dans bien des cas sur celui de l'alternateur et du génie civil de la centrale.

Par exemple, pour les turbines Francis on pourra être amené à faire des choix en fonction de leur vitesse spécifique, des impératifs du site, du mode d'exploitation de la centrale et de l'importance attribuée aux performances :

- choix entre une turbine verticale et une horizontale moins chère, de montage et d'entretien plus faciles;
- choix entre un aspirateur performant, complexe et un autre simplifié meilleur marché;
- choix entre différents types de paliers;
- choix entre plusieurs modes de démontage de la roue;
- choix entre différents degrés de finition des parties hydrauliques.

Figure 5. — Pertes d'une turbine Francis (document Neyrpic).

Si on a intérêt à priori à rechercher la vitesse la plus élevée — ce qui signifie une diminution des poids et des dimensions, et par voie de conséquence du prix — il existe malheureusement des limitations à cette pratique :

Figure 6. — Pertes d'une turbine Pelton (document Neyrpic).

- performances en rendement et cavitation qui se dégradent à partir d'un certain seuil quand la vitesse spécifique augmente;
- plans guides de génie civil déjà établis et commande du distributeur déjà choisi (Francis et Kaplan);
- altitude du site;
- vitesse d'emballlement trop élevée pour la génératrice.

Enfin, pour toutes les turbines autres que les Pelton, le choix de l'enfoncement du groupe a une importance toute particulière sur le Génie Civil et parfois souvent sous-estimée. En effet, la nature même du terrain sur lequel est construit la centrale peut influencer le choix de la vitesse de la turbine. Supposons par exemple que ce terrain soit une roche de bonne qualité, non fissurée, il est alors vraisemblablement inutile de trop enfoncer le groupe, les coûts engendrés par le déroctage supplémentaire ayant peu de chance d'être compensés par les gains réalisés par l'augmentation de la vitesse. Si, par contre, le maître d'œuvre avait besoin de ces rochers pour la construction des différents ouvrages ou si une productivité plus importante due à l'accroissement des performances en découlait, il serait utile de faire un bilan économique.

Technologie

La technologie des machines est assez fortement influencée par les performances attendues et par l'environnement du projet. Une différence de technologie conduit naturellement à une différence de prix.

Par exemple, l'amélioration des performances d'une turbine Francis passe par la réduction des jeux aux labyrinthes, ce qui impose tout naturellement l'emploi d'un palier de grande raideur.

L'utilisation de roulements plus économiques, dont les jeux sont faibles, est en fait limitée par la vitesse d'emballlement de la turbine qui influence fortement la durée de vie du roulement, d'autant plus que la charge radiale croît à l'emballlement.

Lorsqu'il y a nécessité ou imposition d'une fabrication locale, il faut tenir compte de la capacité et des moyens de production du sous-traitant retenu dans la conception de la machine.

Cette sous-traitance locale est, sur bien des points, intéressante et positive pour le pays de l'acheteur. Elle n'en est pas moins difficile à mettre en place et coûteuse.

En somme, la connaissance d'un maximum d'informations sur le projet, qu'elles soient de nature technique, géographique, commerciale, politique, juridique... orientera le constructeur dans ses choix. Il est donc indispensable que ces choix puissent se faire en collaboration avec le client, ou son ingénieur-conseil s'il en a un, dès l'avant-projet et durant son développement.

Matériaux et matériels

L'exemple le plus significatif influant à la fois sur le prix, la qualité et les délais, est donné par la roue. En général, les roues des petites turbines sont coulées en bronze, acier au carbone ou acier inoxydable, quelquefois en fonte. L'acier inoxydable est souvent choisi pour des raisons de résistance mécanique, de résistance à l'usure et à la corrosion, mais son prix est plus élevé et les délais des fondeurs deux à trois fois plus longs que pour les autres matériaux.

La fourniture de la roue est sur le chemin critique, il est possible de gagner en prix et délai en choisissant un matériau moins noble que l'inox mais il faut évaluer, à priori, l'incidence de ce choix sur la fiabilité.

Pour ce qui est des matériels, il existe dans le commerce des paliers et butées dont l'utilisation sur les petites machines permet aussi de gagner en prix et délai.

En contact permanent avec ses propres fournisseurs, le constructeur de la turbine peut, s'il est libre, choisir une technologie appropriée aux exigences du site, du prix et des délais.

Fabrication et contrôle

La fabrication des petites turbines pour lesquelles l'effet de série n'existe pas, demande une organisation des ateliers et de leurs équipes, qui s'apparente à la petite entreprise. Pour répondre aux impératifs de coûts et délais réduits, les constructeurs équipés pour la fabrication lourde devront créer des structures spécialisées ou faire appel à la sous-traitance.

Par ailleurs, les fabrications locales ne permettent pas toujours de gagner sur les prix et les délais. Elles doivent être envisagées et étudiées cas par cas. Elles posent en outre le problème du transfert de technologie.

La rentabilité d'un tel transfert ne peut être assurée que sur des marchés pour lesquels il existe des plans de développement ou des provisions à long terme de la petite hydraulique.

Le mot contrôle est toujours associé à celui de qualité. L'idéal consiste évidemment à faire de la qualité sans contrôle. Le sujet est largement débattu dans la littérature industrielle. Dans le domaine qui nous intéresse, les situations extrêmes sont les suivantes :

- rien n'est imposé,
- le cahier des charges impose programmes et procédures de contrôle.

Dans le premier cas le constructeur doit être en mesure de garantir la bonne tenue de son matériel avec un minimum de dépense, doit faire confiance à ses propres fournisseurs en allégeant les spécifications techniques et en évitant le double contrôle fournisseur-client.

La deuxième situation découle en général de la reprise pure et simple des procédures établies pour les grosses installations. Elles sont alors disproportionnées avec la taille et la simplicité des petites machines. Elles sont même parfois physiquement irréalisables. Le constructeur repèrera sur ses propres fournisseurs les exigences imposées au cahier des charges, créant ainsi un effet en cascade sur les coûts. Heureusement, des efforts sont actuellement faits à l'échelle internationale pour adapter les règles à la juste valeur du produit.

Fiabilité — Maintenance — Exploitation

Il appartient au constructeur de faire preuve de créativité pour proposer aux clients un matériel facile à exploiter, à surveiller et à entretenir. Ces facilités sont néanmoins fonction de la conception générale de la centrale et de son équipement. Par exemple la suppression d'un pont roulant par mesure d'économie complique et renchérit le montage et la maintenance. Elle peut conduire à une modification de la conception des matériels : il est certain qu'une

machine fiable ne nécessite pas l'emploi fréquent d'un pont roulant mais l'arrêt prolongé d'une centrale, faute de moyens de manutention, coûte cher.

On est souvent tenté de préconiser des installations automatiques pour économiser la main d'œuvre mais ce choix peut dépendre du coût de la main d'œuvre. Il faut de plus tenir compte du degré de compétence et de qualification de cette main d'œuvre qui, en général, demande à être formée par le fournisseur du matériel.

Les situations se présentent différemment selon les pays et les types d'exploitants. Ainsi, dans la mesure où le fournisseur est libre de proposer sa technologie, celle-ci peut être adaptée au mode futur d'exploitation.

Les frais d'exploitation comptent pour une part importante dans le passif car ils devront être couverts pendant toute la durée de vie de l'installation.

Certains frais tels que les charges fiscales, impôts, taxes, redevances, n'interviennent pas au titre de la qualité.

Par contre :

- les provisions pour renouvellement du matériel sont directement liées à leur durée de vie, donc à la robustesse, à la résistance mécanique aux sollicitations hydrauliques. Rappelons que les turbines hydrauliques sont conçues pour fonctionner plusieurs centaines de milliers d'heures;
- les frais d'entretien augmentent normalement avec la durée d'utilisation et leur montant est d'autant plus réduit que le matériel est fiable et le service après-vente mieux assuré;
- les frais d'exploitation sont minimisés si le matériel est simple, facile d'entretien, protégé par des sécurités suffisantes et pas forcément redondantes.

L'assurance que représente la robustesse, la fiabilité, la facilité d'entretien n'est certes pas gratuite. Elle est de plus difficile à mesurer mais elle doit être mise en balance au moment du choix de la turbine avec les risques de pertes de production et les surcoûts d'entretien. De ce point de vue, une procédure de quantification dans les cahiers des charges serait réaliste.

La fiabilité est une des dimensions de la qualité d'une turbine, elle peut être estimée et mesurée en kWh perdus annuellement, donc en francs par exemple, avec un poids d'autant plus grand que la perte se situe en période où les kWh sont les mieux payés.

La fiabilité, c'est aussi le maintien des performances dans le temps.

Puisqu'il est difficile a priori de quantifier la qualité liée à l'usage, on peut à l'inverse rapporter un supplément de prix à son temps de retour ou à la valeur du productible annuel.

La durée d'amortissement de cette « prime » ou « surcoût » ne doit évidemment pas dépasser celle de l'ensemble de l'installation.

Pour fixer les idées, supposons que nous ayons à faire à une installation de 1 500 kW sous haute chute dont la turbine Pelton coûte environ 1 000 kF. La vente de la production rapporterait environ 2 millions de F par an. Un gain par fiabilité, évitant un arrêt de la machine et un manque à gagner de 1 % de la production par an, correspond donc à une somme de 20 000 F ce qui, sur 5 ans, pourrait justifier une plus-value de l'ordre de 10 % sur le prix de la turbine.

Par rapport à l'énergie productible théorique obtenue

Figure 7. — Allure de l'énergie produite par une installation hydroélectrique (document Neyrpic).

à partir de l'énergie brute et des rendements des différents éléments (turbine, alternateur, transformateurs, consommation des auxiliaires) l'énergie réellement obtenue est caractérisée par un coefficient μ appelé taux d'exploitation. Il est égal à 1 si la turbine ne s'arrête que lorsque le site ne peut ou ne doit pas être exploité. C'est une fonction du temps qui comptabilise les arrêts de groupe et qui s'apparente globalement à un rendement (exemple figure 7).

La consultation du constructeur à tous les stades du projet et de l'exploitation de la centrale est nécessaire. La réussite du projet repose sur la quantification a priori de l'énergie produite, c'est-à-dire des facteurs η et μ . η est associé à la notion de crédibilité des garanties offertes, μ à celle de qualité et fiabilité.

Figure 8. — Place du constructeur dans le bilan énergétique (document Neyrpic).

Contraintes extérieures

Le maître d'œuvre et les constructeurs ne sont pas toujours libres de concevoir et de réaliser une centrale en fonction des seules données hydrologiques du site et de la valeur de l'énergie produite.

Bien des contraintes sont parfois à l'origine de l'augmentation des coûts, sans raison technique particulière.

Pour illustrer ces propos, nous indiquons ci-après quelques exemples extraits des avant-projets pour lesquels nous avons été consultés et des appels d'offre auxquels nous avons soumissionné durant les cinq dernières années.

Le site : isolement et accessibilité

Les gabarits de transport, poids et dimensions, sont parfois très réduits. Il faut alors décomposer les pièces les plus importantes en sous-ensembles. Ces dispositions entraînent bien souvent des difficultés de montage accrues.

Il faudra aussi tenir compte de l'éloignement et de la difficulté d'accès au site dans la conception du montage, l'organisation et l'approvisionnement du chantier. Ces dépenses sont souvent supérieures à celles de la turbine, notamment quand il y a obligation de transport par hélicoptère.

Les cahiers des charges

Bien souvent ces cahiers des charges sont la copie conforme de ceux établis pour des turbines 100 fois voire 1 000 fois plus puissantes.

Ces documents inadaptés pour les petites installations totalisent un grand nombre de contraintes contraires à l'idée de diminution des coûts et des délais de fabrication. Citons entre autres, parmi les plus souvent rencontrées :

- délai de réponse aux appels d'offre peu compatibles avec la taille des cahiers des charges;
- documents et caractéristiques techniques demandés, très nombreux, parfois peu utiles;
- pénalités sur les délais, les rendements et le productible perdu, si élevées qu'elles peuvent dissuader les constructeurs les plus sérieux et répondre à ces appels d'offres.

Rappelons que ce type de disposition peut avoir un effet pervers et devenir dangereux pour le client (voir paragraphe « les tendances des appels d'offre et leurs risques »). Un constructeur compétent sait fort bien que des rendements élevés pour une petite turbine sont un objectif difficile et que les règles d'évolution de ces rendements dans la gamme des faibles dimensions sont encore peu assurées :

- demandes administratives nombreuses;
- cumul et déplaçonnement des pénalités;
- système d'approbation des plans inadaptés : aller et retour des documents très longs;
- contrôles en atelier ou sur le site parfois impossibles à exécuter, par exemple rayon X dans les zones inaccessibles ou sur des tôles trop minces. Ces contrôles sont même parfois liés à des termes de paiement;
- dispositions techniques parfois préjudiciables, souvent dépassées. Par exemple, l'imposition d'un système d'étanchéité des tourillons de directrices par joint à chevrons au lieu d'un joint O'Ring classique conduisait, pour des raisons de démontage de ce joint, à une augmentation du diamètre de perçage et, par voie de conséquence, du

diamètre du robinet papillon de garde. Le surcoût engendré représentait un pourcentage non négligeable du prix de la turbine.

Prise en compte des progrès techniques

Un certain conservatisme qui ne tient pas compte des progrès techniques, fruits des recherches, impose parfois une solution qui n'est ni la meilleure techniquement, ni la mieux adaptée au site, ni la moins chère, entraînant une perte pour le client.

Compatibilité des garanties techniques

Nous rencontrons quelque fois la disposition suivante : il est prévu de faire un essai de rendement sur modèle réduit en similitude et un autre sur le prototype. Il est demandé au constructeur de garantir les rendements sur modèle et prototype, la formule de transposition étant imposée.

Il est souhaitable, dans l'avenir, que les cahiers des charges soient simplifiés.

Conclusion

Dans le contexte actuel de crise du financement international, et particulièrement du financement pour l'hydroélectricité, il est raisonnable d'estimer que le coût du « mini-hydro » doit être étroitement maîtrisé. Pour un pays en voie de développement, l'éventail des réalisations urgentes est si vaste qu'on ne saurait tolérer de gaspillage dans aucun domaine.

Ce qui pourrait être résumé par cette simple phrase : il faut tirer le meilleur parti d'un site pour un prix minimal. La réduction des coûts est à la charge de tous, à savoir : les constructeurs, le client, l'ingénieur-conseil, les différents organismes par leurs exigences.

Pour aller dans ce sens, nous proposons que les cahiers des charges soient moins rigides, permettant ainsi au constructeur de faire bénéficier le client de toute son expérience et des connaissances apportées par les grosses installations. Nous pensons aussi que la prise en compte des résultats d'un modèle réduit homologué pourrait conduire à cette réduction des coûts. Le client trouvant alors le juste équilibre entre la confiance qu'il accorde au constructeur et la vérification sérieuse des performances.

Nous notons d'ailleurs, avec satisfaction, que notre préoccupation est partagée par d'autres à travers le monde.

Le Guide pour la conception, la réalisation, la mise en service et l'exploitation des petits aménagements hydroélectriques, conçu par La Société Hydrotechnique de France, est déjà un élément de réponse à nos souhaits de constructeur.

Bibliographie

Serge DROZ. — « Les microcentrales hydroélectriques ».

J. OSTERWALDER, L. HIPPE. — Guides lines for efficiency sealing process of hydraulic turbomachines with different technical roughnesses of flow passages. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 22, 1984, n° 2.

G. PICOLLIER, M. WEGNER, P. GIRAULT. — Petites turbines — Rendement des machines et productivité des aménagements. *Revue technique Neyrpic* — n° 4, 1985.

M. TEICHMANN. — IEC looks at small hydro, *Water Power*, n° 11, nov. 1983.

La Houille Blanche, Numéro spécial 4/5 1981 : « Hydraulicité de faible puissance ».

Discussion

Président : M. S. SEYS

M. MAGRI prend la parole pour exprimer la philosophie de la société Hydroart en matière de normalisation de l'équipement dans la gamme 100 à 3000 kW, pour les turbines axiales tubulaires (T.A.T.), Francis et Pelton (fig. 1).

Il indique que compte tenu des nombreux paramètres entrant en ligne de compte (type de machine, mode de réglage, connexion à un réseau séparé ou interconnecté) le coût par kW installé peut varier dans le rapport de 1 à 9.

Il indique également que le coût de l'équipement électromécanique peut représenter 50 % du coût d'installation, les turbines seules participant pour 25 — 30 % à ce coût.

M. MAGRI attire ensuite l'attention sur la nécessité d'adapter le projet au site considéré et fournit deux exemples.

Le premier concerne la réfection d'une chute existante (fig. 2) pour laquelle le client a jugé préférable de sacrifier 6 % de productivité pour permettre l'installation de turbines très simples (3 groupes T.A.T. non réglables, de 850 kW unitaires). Pour cet aménagement le débit maximum disponible était de 33 m³/s sous une chute de 8,80 m. Le deuxième exemple concerne un aménagement de 2 400 kW. Dans ce cas le rendement pondéré était de 3 % supérieur pour une turbine T.A.T. à double réglage, comparée à une machine simple réglable, mais le coût de la machine étant supérieur de 40 % dans le premier cas. C'est donc la solution à simple réglage qui a été retenue. La figure 3 indique comment varie le rendement en fonction de la charge pour les deux types de machines considérées.

M. MAGRI mentionne enfin que l'U.N.I. (organisme italien de standardisation) est sur le point de publier un projet de normes d'homologation des machines standardisées jusqu'à 3000 kW, faisant intervenir des critères de puissance et de rendement garantis. Le Président remercie M. MAGRI et donne la parole à M. ARGENSON.

M. ARGENSON attire l'attention sur l'intérêt économique de réduire les délais de fabrication, et sur l'avantage que peut apporter la standardisation à ce titre. M. PICOLLIER, co-signataire de l'exposé présenté par M. GIRAULT indique qu'il est effectivement possible dans certains cas d'avoir des délais de fabrication de 6-8 mois mais cela reste exceptionnel.

Ce délai dépend de facteurs tels que la nuance d'acier (délai plus court en acier noir), des procédures d'approbation de plans par les ingénieurs-conseil.

Actuellement on obtient normalement des délais de moins d'un an.

M. GIRAULT fait remarquer que la normalisation impose de développer un nombre considérable de machines. Ceci pose de difficiles problèmes d'amortissement, si l'on considère que ce matériel est dépassé 15 ans après sa date de conception.

M. GIRAULT pense que la standardisation devrait être réservée aux très petites turbines.

M. BARRÈRE indique que la notion de certification est également importante et que l'AFME prépare une action dans ce domaine.

DOMAINE DE STANDARDISATION

Chute de 2,5 à 400 m

Puissance de 100 à 3000 kW

1

2

EXEMPLE DE REFECTION D'UNE CENTRALE ANCIENNE

3