Microcentrales hydroélectriques d'une puissance inférieure à 100 kW

Micro hydroelectric stations with powers under 100 kW

Ch. Petit

Leroy Somer

La crise énergétique mondiale fait naître dans tous les pays des besoins, parfois vitaux, pour des sources d'énergie remplaçant les centrales thermiques et groupes électrogènes devenus trop onéreux.

Par ailleurs, le souci de préserver les ressources naturelles oriente les développements vers des énergies douces sans cesse renouvelables. Ceci a redonné à l'exploitation de l'énergie des chutes d'eau un nouvel intérêt.

En complément des grosses centrales électriques destinées à alimenter des réseaux nationaux qui transportent de grosses puissances, les microcentrales permettent de produire de l'énergie en petites puissances à un prix compétitif.

Dans les pays industrialisés, elles constituent une *source d'appoint économisant l'énergie*, qu'elles soient utilisées en source autonome (auto-consommation) ou couplées du réseau national. Elles ne représentent généralement qu'une très faible partie des besoins nationaux et sont souvent utilisées par des personnes ou des organismes privés.

Dans les pays en voie de développement, les microcentrales sont utilisées comme *source d'énergie principale*, base du développement social, agricole et artisanal des régions isolées. Elles deviennent essentielles pour freiner l'exode rural et assurer la survie de villages qui ne seront raccordés au réseau national que dans plusieurs décennies. (Le coût d'une ligne moyenne tension peut coûter entre 80 000 et 120 000 F/km).

Mais l'isolement et le manque de formation de ces populations imposent des équipements très simples et très fiables.

Orientations fondamentales

Dans la conception de ses microcentrales, Leroy Somer s'est fixé comme objectif de répondre aux cri-

tères suivants :

- simplicité du matériel ;
- très grande fiabilité ;
- durée de vie longue (environ 30 ans).

L'analyse des besoins permet de dégager les impératifs suivants :

- un entretien et une maintenance quasi nuls, ne nécessitant pas l'intervention d'un technicien très compétent ;
- un fonctionnement entièrement automatique, assorti de sécurités, mettant l'utilisation de la microcentrale à la portée d'une personne ayant peu de compétence en hydraulique et en électricité ;
- des études préalables simplifiées (hydrologie, génie civil, électricité) permettant de limiter leur coût. D'où des implantations types à partir de gammes standardisées, modulaires ;
- une installation simple à la portée d'entreprises locales peu spécialisées, utilisant des moyens et des matériaux disponibles sur place ;
- la possibilité de fonctionnement sur réseau isolé avec une régulation très fiable permettant des variations importantes et brutales de charge,
- une souplesse de fonctionnement très importante du matériel qui doit s'adapter facilement à des conditions de travail très variables (chute, débit, charges électriques) et compensant parfois des imperfections d'étude ;
- le rendement global, tout en restant important, n'est plus la première priorité ; il est modulé par la simplicité de construction et d'utilisation.

Pour répondre à la forte demande du marché, tout en respectant les critères définis plus haut, Leroy Somer a développé une gamme de microcentrales de basses chutes, petite puissance. Ces microcentrales sont commercialisées sous la marque HYDROLEC.

Figure 1

Les HYDROLECS de très basses chutes, série H

Les HYDROLECS de série H constituent une gamme standardisée couvrant des hauteurs de chutes de 1 m à 10 m pour des puissances électriques fournies de 2 à 50 kW. Les débits varient de 250 à 2 500 l/s. Le montage en parallèle de plusieurs groupes permet de multiplier la puissance installée.

Description du groupe hydroélectrique

La figure 2 montre les éléments constitutifs d'un groupe série H. Ces groupes sont monoblocs, assemblés en usine. Ils constituent un ensemble hydroélectrique complet, conçu pour un fonctionnement immergé.

Figure 2 – Vue éclatée HYDROLEC série H.

a) Enveloppe

L'ensemble tôlerie (2) réalisé en mécanosoudure est constitué de deux cônes concentriques formant col de turbine et diffuseur. Cette solution permet avec un rendement hydraulique satisfaisant de limiter l'encombrement de l'ensemble.

b) Turbine (1)

C'est une hélice à pales réglables à l'arrêt. Les pales en alliage d'aluminium ou en bronze sont rapportées sur un moyeu en fonte.

c) Groupe tournant

L'ensemble multiplicateur-génératrice sur lequel est montée la turbine est fixé à l'intérieur du cône central; L'ensemble est étanche et fonctionne immergé.

d) Génératrice électrique (4)

C'est une génératrice asynchrone, triphasée, basse tension, de même technologie que les moteurs immergés de pompes d'assainissement.

e) Lubrification

L'ensemble tournant est plein d'huile (raccordé sur vase d'expansion).

L'huile assure la lubrification du multiplicateur (pignonnerie, paliers), du joint tournant et des paliers de la génératrice.

f) Rendement

Les rendements globaux des groupes (rendement hydraulique, mécanique et électrique) sont compris entre 0,5 et 0,65 suivant les types et le réglage en débit. Ils se décomposent en :

- rendement hydraulique : 75 à 85 % ;
- rendement mécanique : 94 à 97 % ;
- rendement électrique : 75 à 88 % ;

Caractéristiques générales

- Le groupe est livré complet, monobloc, assemblé en usine.
- Le réglage du débit est continu. Il s'obtient en modifiant manuellement à l'arrêt l'inclinaison des pales.
- Le poids des groupes complets est compris entre 700 kg et 2 tonnes. Leur manutention s'effectue avec des moyens courants (tractopelles, camions grues).

Figure 3 – Vue partielle de l'atelier de montage.

Installation du groupe

Le groupe fonctionne dans toutes les positions pourvu que le diffuseur reste immergé à l'aval. Il peut être monté derrière une conduite forcée ou en prise directe dans une chambre d'eau ou un canal.

Figure 4 — Implantation type HYDROLEC série H.

L'installation devra comporter une grille d'entrée et une vanne de sécurité.

Le montage de plusieurs groupes en parallèle présente de nombreux avantages : sécurité, adaptation aux variations de débit, transport, manutention et entretien simplifiés.

Leroy Somer a équipé des sites comportant jusqu'à 6 microcentrales en parallèle.

La figure 4 montre un schéma d'implantation type.

Caractère dominants

— Le groupe hydroélectrique *monobloc* simplifie les problèmes d'installation et de montage sur le site.
— Le fonctionnement *immergé* présente de nombreux avantages :

- insensibilité aux crues. Le matériel fonctionne totalement noyé ;
- aucune superstructure pour abriter le groupe tournant (économie et avantage esthétique) ;
- insensibilité aux conditions atmosphériques extérieures. Le groupe pourra être installé aussi bien en pays froid qu'en pays chaud (relative stabilité en température de l'eau) ;
- diminution considérable du bruit.

— L'ensemble a été conçu dans un souci permanent de *simplicité* et de *fiabilité*.

- le réglage des pales en version standard est manuel. Il ne comporte aucun mécanisme complexe fragile. (Le réglage s'effectue en 15 minutes environ) ;
- toutes les pièces d'usure (paliers, joint tournant, pignonnerie) sont calculées pour 100 000 heures. Leur remplacement ne représente qu'environ 15 % du prix du groupe ;
- La structure de la base du groupe est calculée pour une durée de vie de 30 ans ;

- Le seul entretien périodique consiste en une vidange du groupe toutes les 10 000 heures (réalisée sans démontage, en 10 minutes) ;
- les paliers de la génératrice sont toujours lubrifiés même en cas d'emballements accidentels répétés ;
- la génératrice asynchrone est plus fiable qu'un alterteur :
 - meilleure résistance mécanique à l'emballement (rotor massif).
 - enrobage des bobinages évitant le claquage même en cas d'entrée d'eau accidentelle.

Elle permet un fonctionnement aussi bien sur réseau isolé que couplée sur un réseau existant (voir page 254).

Les HYDROLECS de moyennes chutes, série C.

Les HYDROLECS de série C constituent une gamme couvrant des hauteurs de chutes de 3 à 25 m pour des puissances électriques fournies de 2 à 50 kW. Les débits varient de 100 à 400 l/s.

Ces groupes sont destinés à équiper des chutes en région de collines ou semi-montagneuses.

Ils existent en 3 versions, pour fonctionnement :

- hors d'eau, sous abri ;
- hors d'eau, à l'extérieur ;
- en immersion permanente.

L'alimentation se fait toujours par conduite forcée. Les rendements sont légèrement supérieurs à ceux de l'HYDROLEC série H (jusqu'à 70 %).

Constitution du groupe

L'eau est admise dans une bache spirale en acier mécanosoudé. La turbine est une hélice avec moyeu fonte et pales rapportées en bronze. Le réglage de

Figure 5.1 – Manutention d'une HYDROLEC série H.

Figure 5.2 – HYDROLECS H en cours d'installation.

débit se fait à l'arrêt par inclinaison des pales. Elle est montée directement sur le bout d'arbre du générateur électrique, sans multiplicateur.

En version standard, celui-ci est du type asynchrone triphasé, basse tension.

Le groupe comprend deux flasques en fonte :

- l'un côté génératrice, comporte 2 roulements à billes à contact oblique qui supportent la poussée axiale ;
- l'autre, à l'aval, forme col de turbine et aspirateur diffuseur.

Figure 6 – Vue éclatée HYDROLEC C.

Caractéristiques générales

- Le groupe est livré complet, monobloc assemblé en usine.
- Le poids des groupes complets varie de 400 kg à 1 tonne.

L'installation du groupe est encore plus simple qu'en série H, car les débits traités sont inférieurs ; donc le matériel est de plus petites dimensions. D'autre part, les pressions restent faibles (3 bars maximum).

Le croquis en figure 7 montre une installation type.

Le groupe peut fonctionner dans toutes les positions, ce qui facilite beaucoup l'adaptation au site existant.

Caractères dominants

- Le nombre de pièces constitutives est très limité et la série a été conçue comme un produit industriel utilisant des composants standard.
- Le groupe monobloc est très simple à installer.
- La limitation à 25 m de hauteur de chute permet de rester dans une gamme de conduites économiques et simples à installer.
- Cette gamme est idéale pour la grande exportation.

Figure 7 – Implantation type HYDROLEC série C.

Microcentrales de plus hautes chutes

Elles sont réservées à des zones montagneuses, en général moins peuplées. Leroy Somer met au point actuellement des séries utilisant l'une ou l'autre des techniques suivantes : Pelton, Francis et dérivées de pompes centrifuges, Banqui, Turgo. Elles seront commercialisées prochainement.

Figure 8 – HYDROLEC C en cours d'installation.

Génératrice et appareillage électrique

Générateur électrique : génératrice asynchrone ou alternateur ?

Rappelons qu'une génératrice asynchrone a la même conception qu'un moteur asynchrone ; le rotor est à cage d'écureuil. Seuls les bobinages et la tôlerie magnétique sont modifiés.

On trouve résumés, ci-dessous, les avantages respectifs des deux types de générateurs.

Avantages des alternateurs

- travail à facteur de puissance variable ;
- stabilité de tension avec la puissance fournie

Avantages des génératrices asynchrones

- grande fiabilité (rotor massif, pas de bobinages tournants) ;
- excellente tenue mécanique à l'emballement ;
- économique en particulier dans des petites puissances.

Couplée en parallèle sur un réseau existant, la génératrice asynchrone ne présente que des avantages.

En réseau isolé, en petite puissance, la génératrice asynchrone présente quelques avantages décisifs par rapport à l'alternateur, en particulier une plus grande fiabilité.

Ce point est déterminant dans notre cas et nous a fait opter pour cette solution. Nous avons développé des solutions qui suppriment les désavantages en réseau isolé :

a) La tension délivrée par une génératrice asynchrone (associée à une batterie de condensateurs fixe) varie avec la puissance délivrée (Fig. 9). Le problème est résolu avec l'utilisation d'un régulateur à absorption d'énergie qui maintient en permanence une charge sensiblement constante sur la génératrice (voir page 254).

Il suffit d'ajuster les condensateurs quand on change le réglage des pales de la turbine. En fonctionnement, la tension restera stable.

b) La tension délivrée baisse quand le facteur de puissance du réseau isolé diminue (charges consommant

Figure 9 — Courbes caractéristiques de fonctionnement d'une génératrice asynchrone.

de l'énergie réactive). En pratique ce problème se rencontre rarement en petites puissances. Il apparaît lorsque l'utilisateur possède des moteurs électriques d'assez grosse puissance ; les solutions sont alors nombreuses :

- compensation des moteurs à $\cos \varphi = 1$ par condensateurs permanents.
- insertion temporaire de condensateurs au démarrage des moteurs.
- démarrage progressif des moteurs (étoile triangle, résistances statiques, coupleurs).

On obtient ainsi des performances voisines de celles des alternateurs.

Toutes les minicentrales ainsi que les équipements destinés à électrifier les anciennes roues commercialisées par Leroy Somer, utilisent des génératrices asynchrones. Plus de 200 installations fonctionnent ainsi en France sur réseau isolé et donnent toute satisfaction.

Appareillage électrique pour couplage au réseau

La génératrice est couplée électriquement sur un réseau existant comportant des alternateurs de puissance suffisante (au moins égale à celle de la microcentrale). C'est le cas lorsque la minicentrale débite sur :

- le réseau national ;
- en parallèle avec un groupe électrogène ;
- ou sur une centrale hydroélectrique de plus grosse puissance.

Le réseau impose alors à la minicentrale ses caractéristiques électriques (tension, fréquence).

L'appareillage électrique comprendra :

- les automatismes et sécurités basse tension ;
- éventuellement le transformateur et la cellule MT si le raccordement se fait sur une ligne moyenne tension.

Appareillage électrique pour fonctionnement sur réseau isolé

En réseau isolé, l'appareillage comprend :

- un dispositif de régulation ;
- une armoire électrique (automatismes et sécurités).

a) Le dispositif de régulation devient nécessaire pour stabiliser les caractéristiques électriques (tension, fréquence), lorsque :

- la puissance prélevée par l'utilisateur varie ;
- la puissance hydraulique d'entrée varie.

Le rôle du régulateur est de maintenir l'équilibre entre la puissance prélevée et la puissance fournie sur le réseau d'utilisation.

Une solution traditionnelle consiste à réguler en modifiant le débit turbiné par réglage mécanique de la minicentrale. Cette solution présente de nombreux inconvénients : temps de réponse relativement lent et complexité du dispositif mécanique de réglage.

Figure 10 — Schéma de principe de fonctionnement du régulateur.

Leroy Somer a adopté une autre solution : la régulation par absorption d'énergie. Le principe est simple :

- le réglage de la turbine n'est pas modifié ;
- la minicentrale produit une puissance qui ne dépend que de son réglage et de la hauteur de chute ;
- l'utilisateur peut prélever une partie de cette puissance, le reste étant détourné sur une charge non prioritaire (circuit secondaire).

Le régulateur se comporte comme un aiguillage de la puissance entre le circuit principal et le circuit secondaire. Quand la charge prélevée par l'utilisateur sur le circuit principal varie, le régulateur intervient en modifiant la charge en service sur le circuit secondaire et ramène ainsi la charge totale sur la génératrice à une valeur sensiblement constante. Il stabilise ainsi la tension et la fréquence.

Le paramètre de régulation est la fréquence électrique sur le circuit principal. Dès qu'elle varie, le régulateur intervient instantanément. Le circuit secondaire est constitué par des résistances chauffantes dans l'air ou dans l'eau, des charges non prioritaires, eau chaude, pompage, réfrigération, ou un système de stockage d'énergie.

Leroy Somer a développé sur ce principe un régulateur breveté. Ses principaux avantages sont :

- temps de réponse extrêmement court.
- très grande fiabilité ;
- stabilité électrique en fonctionnement de $\pm 5 \%$ sur la tension et $\pm 0,5 \%$ sur la fréquence.

Figure 11 – Régulateur électronique à absorption d'énergie.

Remarques

- 1) le régulateur fonctionne aussi bien sur génératrice asynchrone que sur alternateur.
- 2) Cette régulation peut être combinée avec une régulation hydraulique. La régulation hydraulique assure la régulation en régime continu ; la régulation électronique agit pendant les régimes transitoires.
- 3) Leroy Somer commercialise des régulations électroniques jusqu'à 150 kW.

4) Cette régulation peut être considérablement simplifiée pour certaines applications simples (chauffage, nombre de charges limitées. . .).

b) En complément de ses régulateurs, Leroy Somer propose une gamme d'armoires électriques standardisées pour ses microcentrales HYDROLEC fonctionnant sur réseau isolé.

Ces coffrets assurent les automatismes nécessaires au fonctionnement (séquence d'arrêt et de démarrage) et regroupent les sécurités et protections (disjoncteur différentiel, relais de fréquence détectant le départ à l'emballlement, sécurité de manque d'huile, arrêt d'urgence. . .).

Des armoires spéciales ont été mises au point pour :

- commande incorporée de manœuvre de vannes ;
- marche automatique de plusieurs minicentrales en parallèle ;
- fonctionnement en parallèle sur groupe électrogène ;
- couplage sur réseau existant basse tension.

Engineering et microcentrales de petite puissance

La mise en place du groupe hydroélectrique lui-même est relativement simple. Par contre, l'ensemble d'un projet d'équipement de microcentrale représente une part d'engineering assez importante ; elle comprend :

- les études préalables (hydrologie, génie civil, électricité) ;
- la réalisation de la prise d'eau, des canaux ou/et conduites, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

Le coût du groupe hydroélectrique et de son appareillage ne représente qu'une fraction du coût total du projet :

- de 30 à 80 % en pays industrialisés (réaménagement des moulins désaffectés) ;
- de 10 à 20 % en pays en voie de développement (aménagement de chutes vierges).

En Europe, et récemment aux Etats-Unis, Leroy Somer a constitué un réseau "d'installateurs agréés" qui assurent la vente clefs en mains des HYDROLECS. Dans les pays en voie de développement, le problème de l'engineering est beaucoup plus complexe à cause du manque d'expérience des entreprises locales, du peu de données hydrologiques et de la taille des projets (intégration de la microcentrale dans un projet plus vaste d'aménagement des cours d'eau et d'utilisation d'énergie).

Le développement des microcentrales dans ces pays passe par la formation théorique et pratique des responsables techniques locaux, au moins pour la partie réalisation. Cet effort de formation permettra de déboucher alors sur une part de valeur ajoutée locale importante et évitera le déplacement fréquent de spécialistes étrangers.

Economie et avenir des microcentrales

En pays industrialisés, l'avenir des microcentrales est lié au prix du kWh vendu à l'utilisateur (ce prix intègre le coût de production et de transport).

Les conditions économiques actuelles permettent l'installation de microcentrales dans des conditions de rentabilité satisfaisantes. Le prix d'achat actuel d'un groupe hydroélectrique seul avec son appareillage électrique varie entre 2000 et 10000 francs au kW. Il diminue quand la puissance et la hauteur de chute augmentent.

Une fois installée sur un ancien moulin, la microcentrale coûte entre 3000 et 20000 francs au kW. Ce prix dépend beaucoup des frais de génie civil.

Au prix actuel de l'énergie, le rééquipement d'un ancien moulin, en France, est amorti entre trois et quinze ans, avec une moyenne de 6 à 8 ans. La rentabilité devrait s'améliorer dans les prochaines années. A titre d'exemple, le marché potentiel français est de 10 000 à 20 000 moulins désaffectés rééquipables. Les marchés parallèles d'Europe et d'Amérique du Nord permettent de multiplier ce chiffre par 5 environ.

Leroy Somer commercialise actuellement plus d'une centaine de minicentrales par an en France et a commencé la distribution de ces produits en Europe et en Amérique du Nord.

En pays en voie de développement, l'avenir des MCH est lié au développement agricole et industriel de ces pays. Le coût au kW installé dépend principalement des frais d'engineering très variables d'un projet à l'autre. Il peut être évalué de 10 000 à 60 000 francs au kW installé (sans la ligne de transport). Une microcentrale installée de 10 kW représente ainsi le coût de 2 à 10 km de ligne moyenne tension. Les coûts directs d'exploitation sont par la suite insignifiants.

De nombreuses études sur des projets précis montrent qu'actuellement la microcentrale est la source d'énergie décentralisée la plus économique au kWh produit pour des puissances installées de quelques dizaines de kW, à condition bien sûr que l'énergie soit consommée près du site (transport inférieur à quelques km) et régulièrement tout au long de la journée. (Le stockage d'énergies de quelques centaines de kWh est encore très onéreux). Les seuls freins actuels au développement rapide des microcentrales en pays en voie de développement sont :

- le manque de compétence locales (hydrologie, engineering) ;
- les difficultés de financement dues à la pauvreté de certains pays.

Pourtant l'avenir des MCH semble assuré à moyen terme.

Tous les pays en voie de développement possédant des chutes d'eau incorporent actuellement dans leurs plans de développement des projets de microcentrales de petite puissance. Ceci est dû à la volonté politique de leurs dirigeants d'harmoniser le développement social agricole et industriel de leur pays, sans copier le système centralisé de production d'énergie des pays occidentaux qui s'adapte mal à leurs besoins nationaux.

Figure 12.1 et 12.2 — Microcentrales HYDROLEC en cours d'installation.

Abstract

Micro hydroelectric stations with powers under 100 kW

In order to respond to the growing demand for low-power micro hydroelectric stations, the firm Leroy Somer has developed the HYDROLEC range of micro stations, whose design is original.

These hydroelectric sets comply with two essential objectives: simplicity and reliability.

Their design simplifies problems of installation, use and maintenance.

The range covers heads of 1 to 25 m and turbined flows of 100 to 2,500 l/s; the electrical powers per unit vary according to the type between 2 and 50 kW. The installed power can be multiplied by placing several micro stations in parallel. In the standard version, the sets deliver three-phase low-voltage AC current: 380 V at 50 Hz or 460 V at 60 Hz.

The sets form a single block; their reduced weight and volume simplify transport and installation.

They use Kaplan turbines with blades adjustable when stationary. Continuous control of the flow is obtained by manual alteration of blade angle.

Series H. (1 to 10 m of head, 2 to 50 kW)

These are compact hydroelectric sets that operate submerged in the downstream spillway channel. This arrangement offers numerous advantages; there is no superstructure and they are unaffected by flood conditions and the prevailing weather. The whole is designed with continuous concern for simplicity and reliability; the construction is robust using tried technologies; parts are calculated for a working life of 100,000 hours, and maintenance is virtually zero. The set can be installed in any position, behind a power penstock or directly in a water chamber.