

L'HYDROÉLECTRICITÉ DU FUTUR

EN AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

État des lieux | Trajectoires futures | Tendances sur les marchés







ROLAND VIDIL

Président Hydro 21

LIVRE BLANC

L'HYDROÉLECTRICITÉ DU FUTUR EN AUVERGNE- RHÔNE-ALPES

Guide pratique proposé par Hydro 21 et réalisé par un collectif de Chefs d'Entreprises de la production d'électricité, de l'ingénierie, de la construction mécanique, du revêtement industriel, du contrôle-commande.



Directeur de la publication : Roland VIDIL
rvidil@wanadoo.fr

Création graphique - Coordination :
www.adeocom.fr

Nota : Le contenu des articles est sous la
seule responsabilité de leurs auteurs.

Juin 2019

ÉDITO

Hydro 21 : un écosystème unique en Europe

La Région Auvergne Rhône-Alpes, est la 1ère région industrielle de France avec 500 000 emplois industriels, le 8ème PIB européen avec 242 Md€ et le 2ème pôle de R&D de France avec 40 000 chercheurs et 10 pôles de compétitivité¹.

C'est le berceau de la houille blanche ; elle accueille le parc hydraulique le plus important de France. Ce territoire dispose des savoir-faire, de l'expertise industrielle, des centres de recherche et de formation pour s'affirmer comme le centre de gravité de cette filière industrielle et de son rayonnement au niveau national, européen et international.

Son dynamisme économique et le potentiel de ses centres de recherche publics et privés en font un territoire extrêmement attractif pour de nombreuses entreprises françaises ou internationales, qui y ont installé leurs sièges ou leurs centres de R&D.

Aujourd'hui, environ 10 000 personnes sont engagées sur le terrain de l'hydroélectricité, entre Grenoble, Chambéry et Lyon. Cet ensemble de compétences n'a pas d'équivalent quand on le compare aux spécialistes de l'hydroélectricité en Suisse, Italie ou Autriche.

Le livre blanc sur l'hydroélectricité du futur

La discussion récente sur la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) nous amène à une réflexion prospective sur le mix énergétique à 15 ans et sur la place de l'hydroélectricité. Cette réflexion permet de pointer le véritable défi qui nous attend.

Comment, avec une proportion d'énergies intermittentes de l'ordre de 35% au lieu de 5% aujourd'hui, le système électrique va-t-il pouvoir s'organiser ? Une question centrale est comment

seront réparties les sources pilotables comme les centrales hydrauliques, biomasses ou nucléaires et les sources non pilotables comme l'éolien ou le solaire. Il y a une nécessité à développer une vision d'ensemble du système énergétique à 15 ans, des besoins et des solutions disponibles avec leurs capacités et leur complémentarité pour mieux guider les développements futurs.

De nombreux marchés restent ouverts car le potentiel hydroélectrique mondial est loin d'être exploité

L'hydroélectricité qui apporte déjà les 3/4 de l'électricité d'origine renouvelable dans le monde va se développer fortement dans les prochaines décennies et cette filière contribuera de façon majeure à décarboner les systèmes de génération électrique et va contribuer également au développement économique des territoires.

Une nouvelle donne va se mettre en place avec un rôle renforcé de l'hydro qui va profiter de la montée en puissance de l'éolien et du solaire pour jouer son rôle de régulateur avec une énergie à la fois stockable et très flexible. Ces atouts ont été bien illustrés lors du récent colloque du 7 décembre 2018 organisé par Hydro 21.

L'hydroélectricité au cœur des enjeux énergétiques de demain

Toutes ces mutations nous amènent à repréciser la place de l'hydro dans le futur.

Ce livre blanc a pour objectif de promouvoir la filière hydroélectrique au niveau national et d'être un levier puissant pour sensibiliser les pouvoirs publics, afin de positionner à son juste niveau la place de l'hydroélectricité au sein des énergies renouvelables, acteur essentiel de la transition énergétique de demain.

1. Source : CCI Grenoble – Novembre 2016.
Magazine Présences

SOMMAIRE

1

ÉTAT DES LIEUX ET CARTOGRAPHIE DE LA FILIÈRE HYDROÉLECTRIQUE

p.14

1.1

L'hydroélectricité en France

p.17

1.2

L'hydroélectricité en Auvergne-Rhône-Alpes

p.21

1.3

Les acteurs de la filière Hydro en Auvergne-Rhône-Alpes

p.24

1.4

Les actions de promotion de l'hydroélectricité

2

LES TRAJECTOIRES DE L'HYDROÉLECTRICITÉ À L'HORIZON 2030

p.28

2.1

Place actuelle et perspectives de l'hydro dans le mix électrique

Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX - Économiste et Président d'Honneur de Hydro 21

p.30

2.2

La politique énergétique de l'Union Européenne atteint-elle ses objectifs ?

Dominique GRAND - Physicien et Membre de Gire

p.32

2.3

L'apport de l'hydroélectricité pour la sécurité du réseau électrique et la gestion de l'intermittence

Christian LE BRUN - Physicien et Membre de Gire

p.34

2.4

Analyse systèmes et hybridations énergétiques : flexibilité décarbonée et hydroélectrique

David FRABOULET - Physicien Ingénieur CEA Grenoble

p.36

2.5

La difficile réforme du régime des concessions hydroélectriques

Dominique FINON - Économiste CNRS - Grenoble

p.38

2.6

L'AFD et le déploiement de l'hydroélectricité dans les économies en développement ou émergentes

Sébastien CARREAU & Christian DE GROMARD - Agence française de développement

p.40

2.7

La place de l'innovation pour l'hydroélectricité

Claude REBATTET - Grenoble INP et Directeur du CREMHyG

p.42

2.8

L'hydraulique, une énergie dont la valeur tient à sa flexibilité et à sa stockabilité

Jacques PERCEBOIS - Professeur Emérite à l'Université de Montpellier

p.44

2.9

Faire mieux rayonner l'écosystème alpin

Roland VIDIL - Président Hydro 21 et Membre de Gire

p.46

2.10

La rubrique hydroélectricité de l'encyclopédie de l'énergie

Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX - Économiste et Président d'Honneur de Hydro 21

3

TENDANCES SUR LES MARCHÉS ET FEUILLE DE ROUTE DES ACTEURS

p.50

3.1

La petite hydro : marchés actuels et futurs

Interview Jean-Philippe REILLER - Président d'Alpes Hydro Association

p.52

3.2

Les marchés actuels et futurs de l'hydro en France

Interview Frédéric HOFMANN - Directeur développement EDF Hydro

p.54

3.3

Les marchés des équipements hydro à l'export

Interview David HAVARD - Chef de Produits I Division Hydro de GE Renewable Energy

p.56

3.4

Les ENR entre hydroélectricité et hybridation

Interview Frédéric STORCK - Directeur Transition Énergétique et Innovation de CNR

p.58

3.5

Former les ingénieurs pour les transitions de demain

Interview Yves MARECHAL - Directeur de Grenoble INP-ENSE³

4

LES 7 PROPOSITIONS D'HYDRO 21





ÉTAT DES LIEUX ET CARTOGRAPHIE DE LA FILIÈRE HYDROÉLECTRIQUE



Auvergne
Rhône-Alpes
Entreprises

Ce panorama, réalisé par le service Intelligence Économique et Territoriale d'Auvergne-Rhône-Alpes Entreprises¹, dresse un portrait de la filière hydroélectrique et de ses acteurs en région.

Le recensement des acteurs s'inspire d'une segmentation proposée par Hydro 21 pour caractériser ses adhérents autour de quatre grandes activités qui sont l'ingénierie, la R&D, la construction et

la production d'énergie. Cet état des lieux a été réalisé selon une méthodologie propre à l'agence, en fonction des sources disponibles ; ce document ne prétend pas à l'exhaustivité.

Le panorama a été complété et enrichi par les propositions et réflexions du comité de pilotage de Business Hydro et des représentants de la CCI, du CETIM, de la Direccte, de la FIM, ...

1. L'Agence régionale Auvergne-Rhône-Alpes Entreprises accompagne les entreprises industrielles et de services à l'industrie à toutes les étapes de leur croissance : implantation, développement, innovation, international. Elle répond également à leurs besoins en matière de recrutement, de formation et d'accès aux financements et projets européens.

L'HYDROÉLECTRICITÉ EN FRANCE

CHIFFRES CLÉS SUR LA PLACE DE L'HYDRO ²



3^e pays européen

producteur d'électricité d'origine hydraulique
(derrière la Norvège et la Suède)



1^{ère} source d'électricité renouvelable

en France



12% de l'énergie électrique

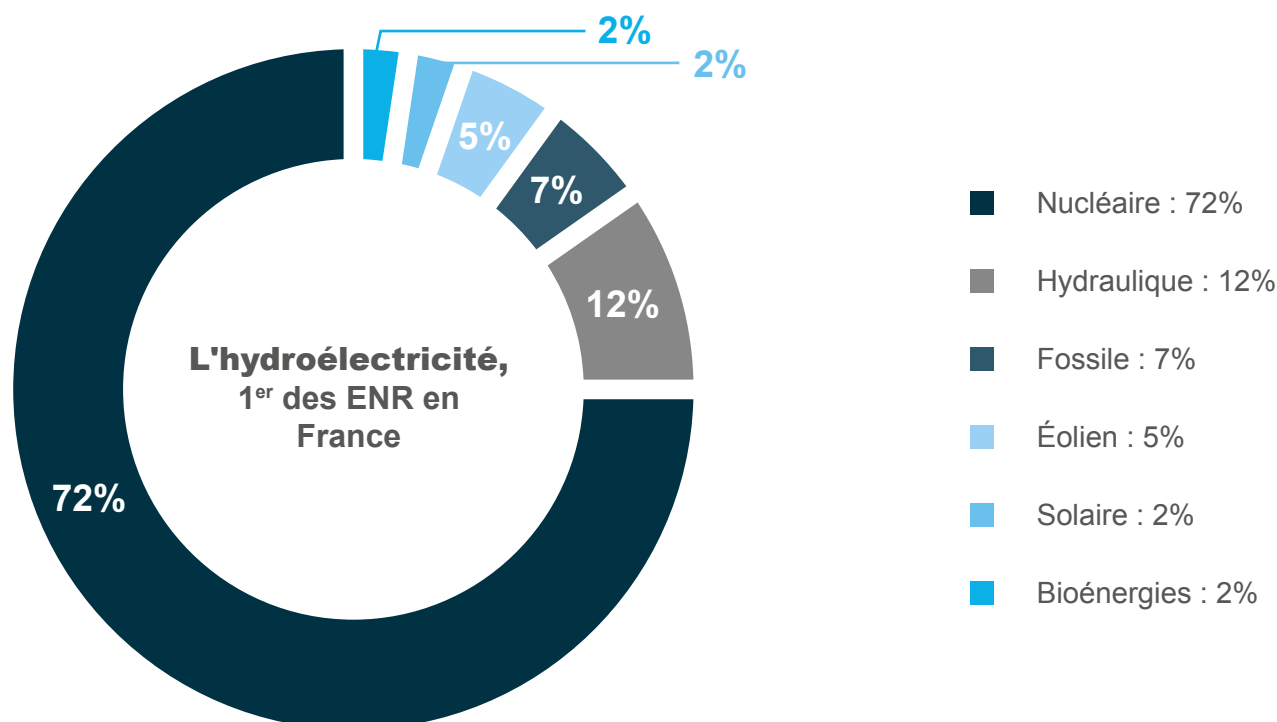
produite en France



20 000 emplois

directs, indirects et induits (2012)
Projection 2020 : 30 000 emplois

PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN FRANCE EN 2018 = 68 TWh ³

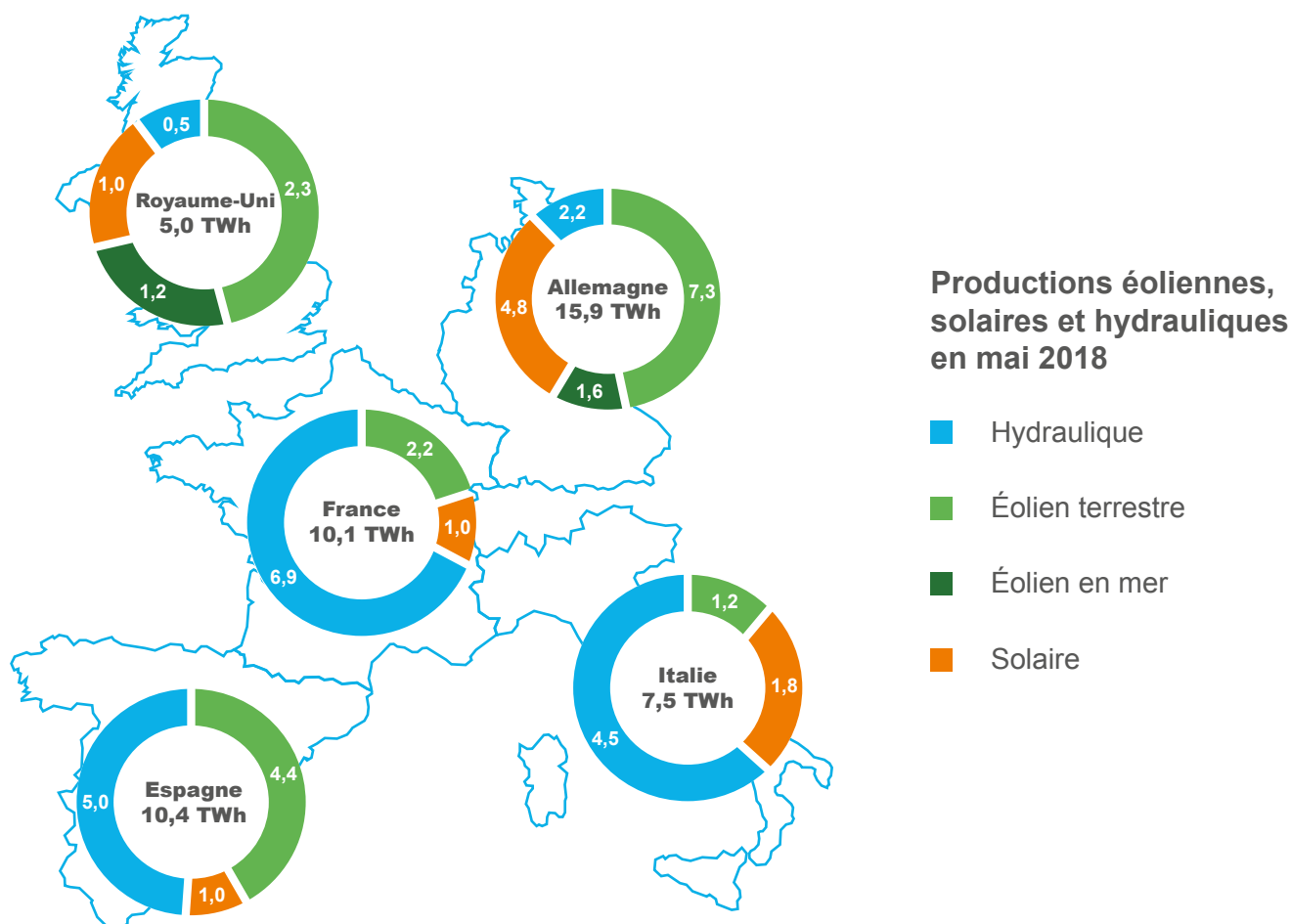


2. France Hydro, SER, EDF Une Rivière Un Territoire, Ministère de la Transition écologique et solidaire, RTE.

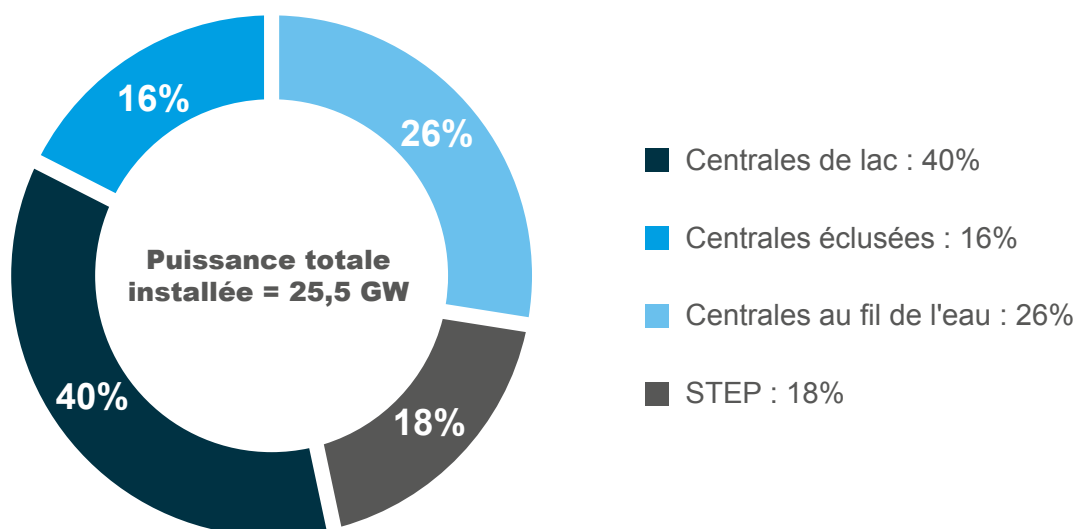
3. RTE, Bilan électrique 2018.

PLACE DE L'HYDROÉLECTRICITÉ PAR RAPPORT AUX AUTRES ENERGIES RENOUVELABLES AU NIVEAU EUROPÉEN ⁴

Production renouvelable mensuelle (en TWh)



COMPOSITION DU PARC HYDROÉLECTRIQUE FRANÇAIS ⁵



4. Extrait de la conférence de Frédéric Dohet - RTE lors des rencontres de Business Hydro 2018.

5. Site web FHE.

L'HYDROÉLECTRICITÉ EN AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

CHIFFRES CLÉS ⁶



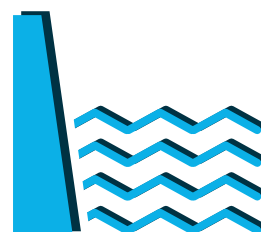
1^{ère} région française pour l'hydroélectricité

Plus de 11 600 MW installés, soit 45% du total national



4 des 6 STEP françaises

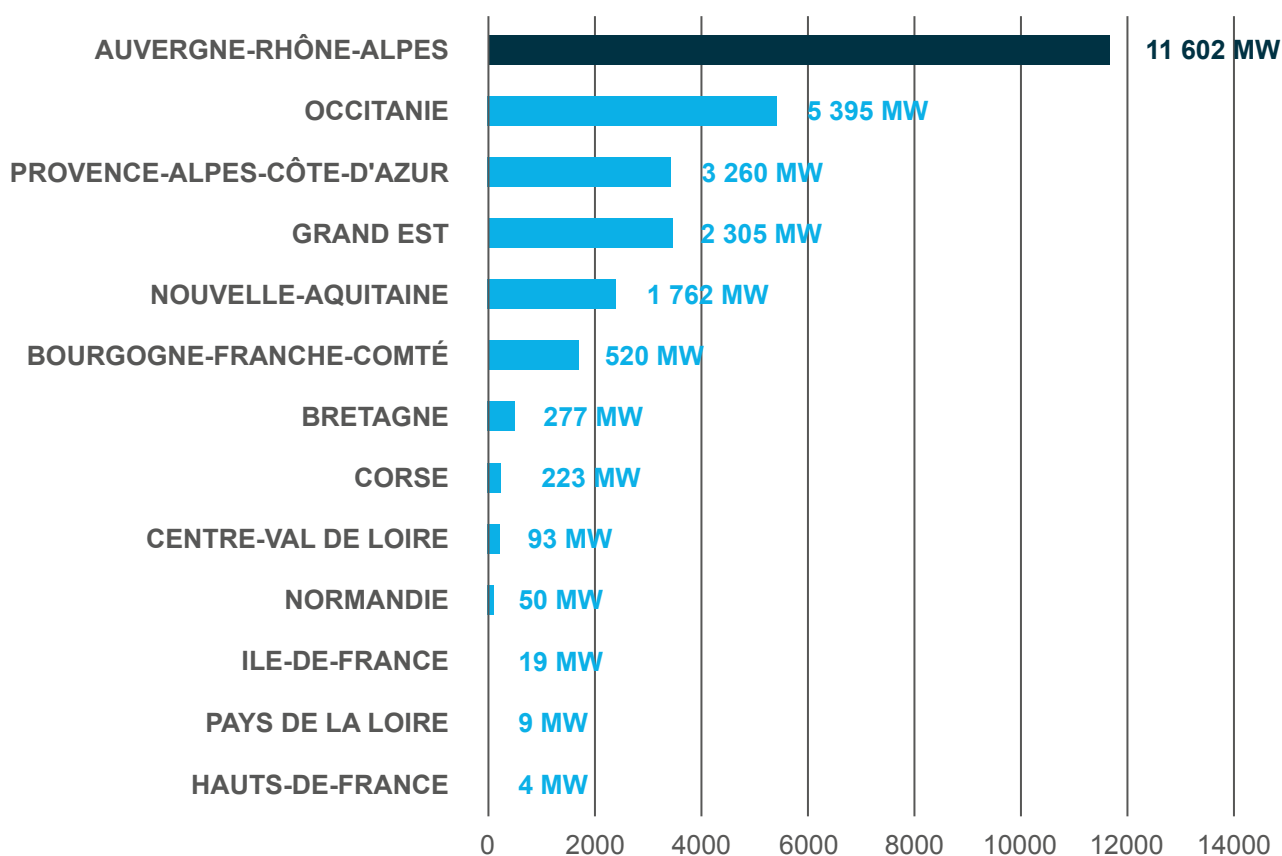
Sont situées en Auvergne-Rhône-Alpes (Isère & Savoie)



La Centrale de Grand Maison

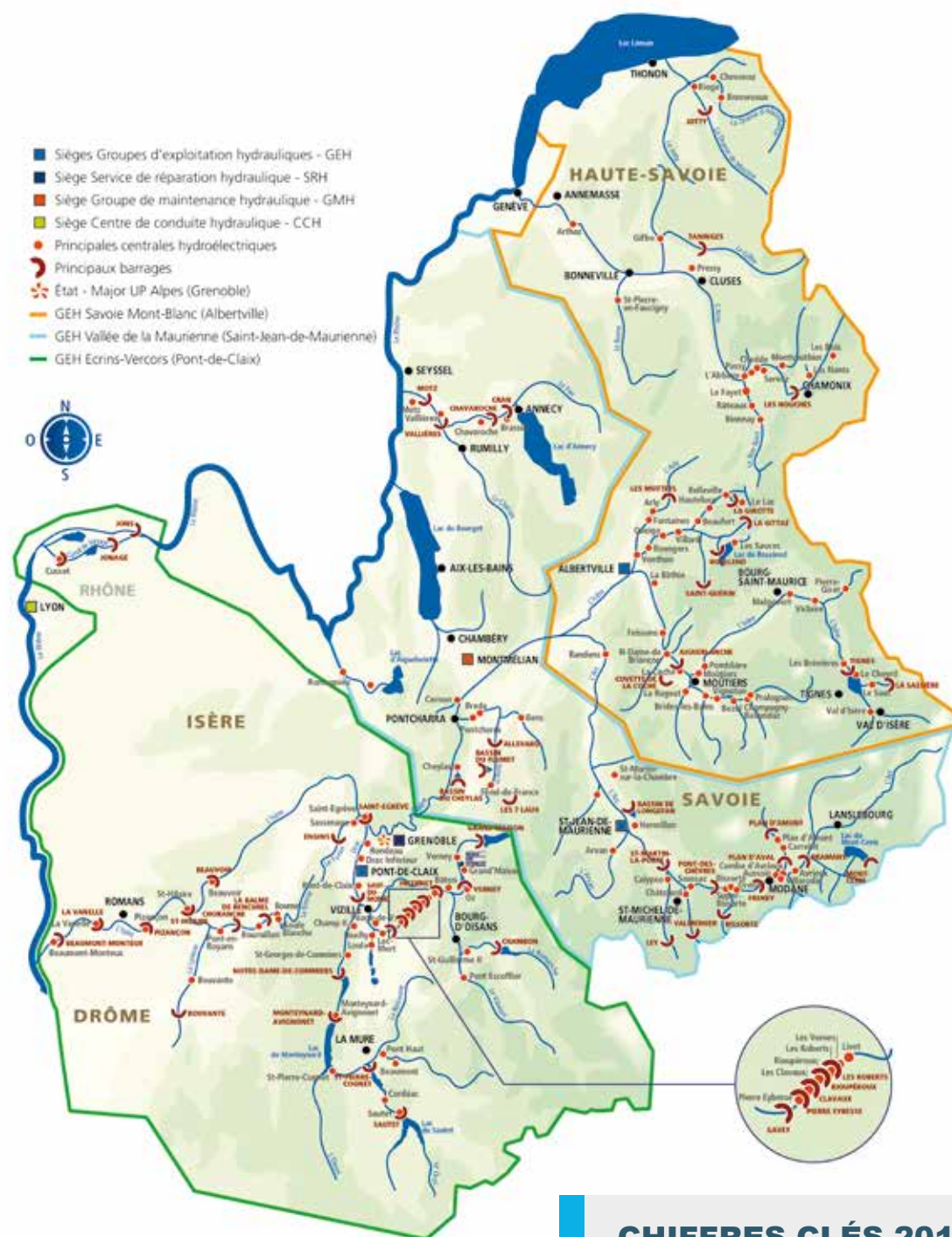
La plus puissante STEP de France : 1800 MW installée

Puissance installée (en MW) par région en France



6. France Hydro Électricité, EDF Une Rivière Un Territoire, CNR.

LES ÉQUIPEMENTS EDF HYDRO SUR L'ISÈRE ET SES AFFLUENTS

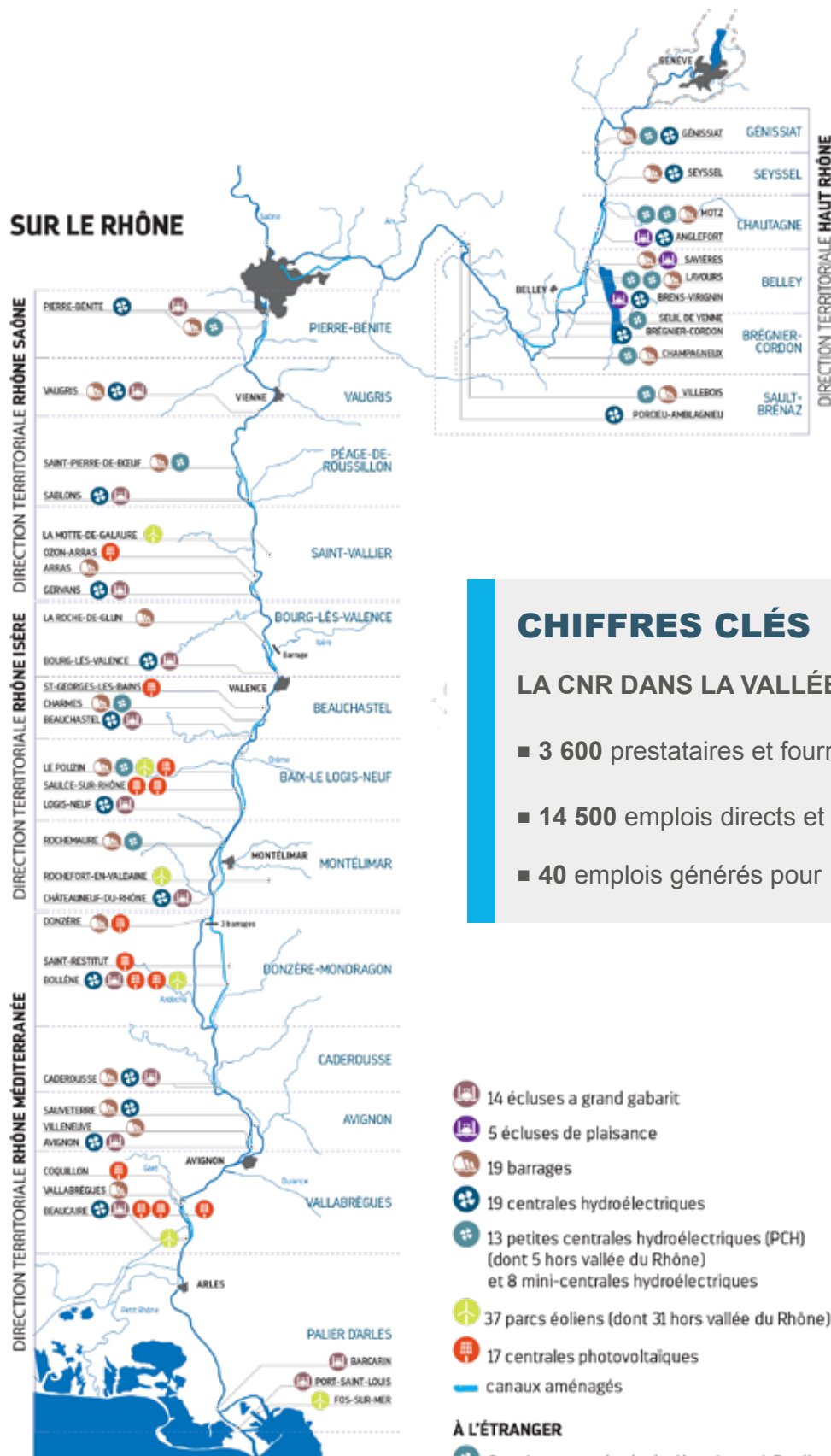


CHIFFRES CLÉS 2018

EDF HYDRO DANS LE SILLON ALPIN

- 200 M€ d'achats aux prestataires de la Région
- 18 TWh (équivalent consommation domestique de 8 Mhab)
- 159 centrales hydroélectriques / 9000 MW
- 27% de la production Hydro française
- 2600 hydrauliciens EDF

LES ÉQUIPEMENTS CNR SUR LE RHÔNE



LA PETITE HYDROÉLECTRICITÉ ⁷

Définition : Petite hydro < 10 MW
Très petite hydro < 1 MW
Pico hydro < 20 KW



Un secteur porteur

- Potentiel de développement : 1,7 TWh à l'horizon 2030
- Appel d'offres pluriannuel du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire pour relancer la petite hydro, en cours

En Auvergne-Rhône-Alpes

50% de la petite hydro française est installée dans les Alpes

Près de **1 000 centrales**

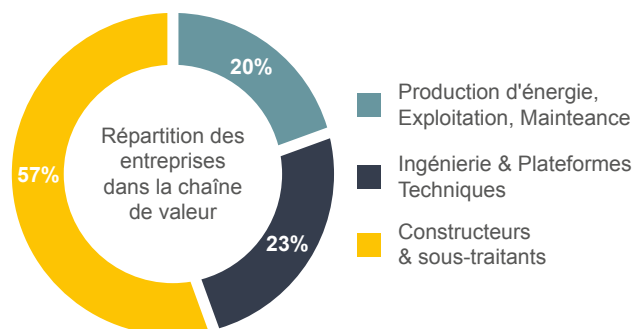
La petite hydro représente **95% des installations de montagne**

7. Actes du colloque « La petite hydroélectricité en montagne », Juin 2017 - Green Univers - Hydro 21 - France Hydro Électricité - Alpes Hydro

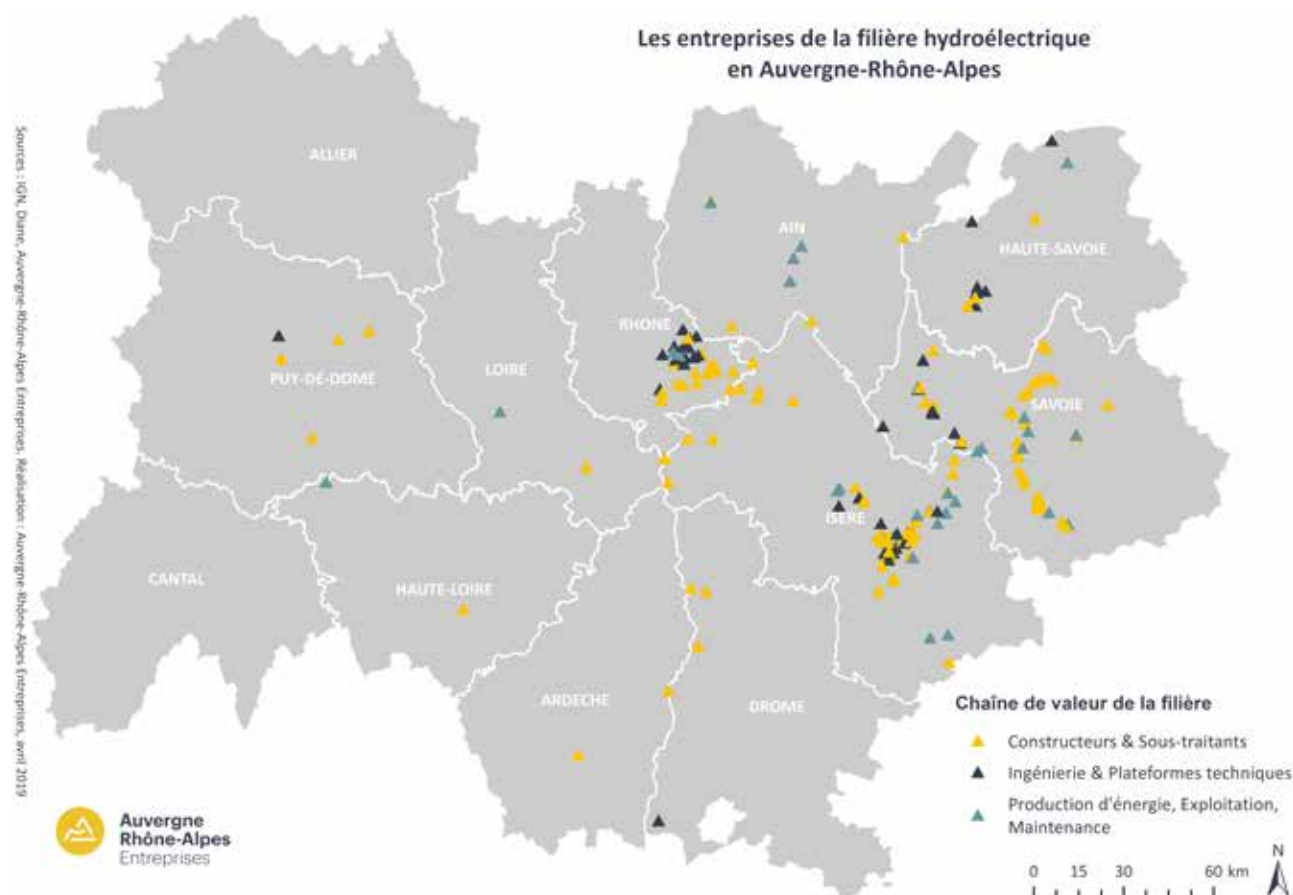
LES ACTEURS DE LA FILIÈRE HYDRO EN RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

CHAÎNE DE VALEUR DE LA FILIÈRE

- Un tissu d'entreprises de toutes tailles
- Près de 230 entreprises identifiées en région ⁸
- L'ensemble de la chaîne de valeur bien représenté en Auvergne-Rhône-Alpes



- Une concentration d'entreprises dans le sillon alpin et en région lyonnaise



NB : Les entreprises ayant plusieurs établissements en région n'apparaissent qu'une seule fois sur la carte (établissement retenu : le siège ou, à défaut, l'établissement ayant le plus de salariés).

8. Liste non exhaustive, établie à partir des adhérents des réseaux locaux.

INGÉNIERIE ET PLATEFORMES TECHNIQUES

Tous les grands acteurs sont présents en région Auvergne-Rhône-Alpes :

GENERAL ELECTRIC HYDRO
Conception et fabrication de turbines, d'équipements hydromécaniques et de systèmes de commandes pour centrale hydroélectrique.

ARTELIA
Dans le top 20 mondial de l'ingénierie des barrages ; conception, maîtrise d'œuvre, expertise, conseil et audit.

EDF HYDRO
Deux grandes unités d'ingénierie : **Direction Technique Générale**, spécialisée dans les mesures de pointe, et **Centre d'Ingénierie Hydraulique**, spécialisé dans la conception et la réalisation d'aménagements hydrauliques.

CERG
Centre d'Etudes et d'Essais spécialisé en mécanique des fluides.

CACOH
Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques de CNR Ingénierie.

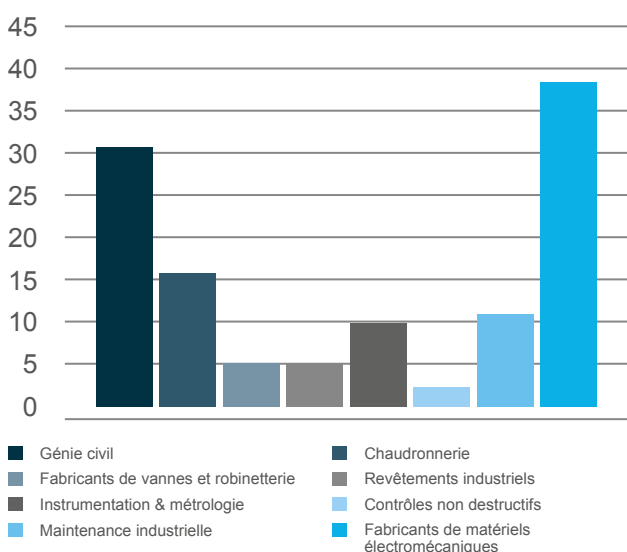
CREMHYG
Centre de recherche et essais de machines hydrauliques de Grenoble INP - Caractérisation de turbines pompes.

BUREAUX D'ÉTUDES
Une dizaine de bureaux d'études comme Alp'études, Erema, Hydro-M, Hydreole, Hydrétudes, Stromkarlen, ...



CONSTRUCTEURS ET SOUS-TRAITANTS

La spécificité de la région Auvergne-Rhône-Alpes



Plus de la moitié des entreprises répertoriées sont réparties dans toutes les briques technologiques, à savoir :

Génie Civil

Chaudronnerie

Fabricants de vannes et de robinetterie

Revêtements industriels

Contrôles non destructifs

Instrumentation et métrologie

Maintenance industrielle

Fabricants de matériel électromécanique

PRODUCTEURS D'ÉNERGIE, EXPLOITATION, MAINTENANCE

- Une quarantaine d'entreprises répertoriées ⁹
- Grands groupes et producteurs indépendants



ACTEURS ACADÉMIQUES, RECHERCHE & FORMATION

- Plusieurs structures de recherche dédiées aux ENR et à l'hydroélectricité

- Institut Carnot Energies du Futur
- Chaires de Grenoble INP et de la Fondation Université Grenoble Alpes
- Centre de Recherche et d'Essais de Machines Hydrauliques de Grenoble (CREMHyG)
- Encyclopédie de l'environnement et de l'énergie



- Une offre de formation en hydraulique

- Filière ingénieur de l'école ENSE³ sur "Hydraulique, ouvrages et environnement"
- Master International "Hydraulic and Civil Engineering" et "Fluid Mechanics and Energetics"



- Plusieurs centres techniques mobilisés = CETIM

- Une forte concentration d'acteurs dans le sillon alpin



9. Recensement non exhaustif, réalisé à partir des listes d'adhérents des réseaux locaux

LES ACTIONS DE PROMOTION DE L'HYDROÉLECTRICITÉ

ÉVÉNEMENTS EXTERNES

Ouverture des installations de la petite hydro



www.alpes-hydro.com

Comité de programme Tenerdis



www.tenerdis.fr

Symposium du Comité Français des barrages et réservoirs



www.barrages-cfbr.eu

Maison Berges-Musée de la houille blanche



www.musees.isere.fr/musee/maison-berges

Musée Hydrélec



www.musee-edf-hydrelec.com

ÉVÉNEMENTS ORGANISÉS PAR HYDRO 21

Avec accès privilégié pour les adhérents à l'association (www.hydro21.org)

Business Hydro (4^{ème} édition en 2019)



- **Rencontres d'affaires** de la filière
- **800 visiteurs** attendus en 2019
- Plus de **70 exposants**
- Présence de **grands témoins**
- Création du **Village Experts Business**

Focus Hydro (10^{ème} édition en 2019)



- **Promotion de l'hydroélectricité**
- **250 experts** de l'hydroélectricité réunis
- Une **dizaine de conférenciers** de renom
- Le **colloque de référence de la filière hydro** dans les Alpes

LES TRAJECTOIRES DE L'HYDRO À L'HORIZON 2030

L'association Hydro 21 organise depuis une dizaine d'années un colloque réunissant plusieurs centaines de personnes et mettant en valeur les diverses qualités de l'hydroélectricité : sa disponibilité, sa flexibilité, ses capacités de stockage, ses complémentarités avec les énergies intermittentes, ses potentiels sur la petite hydroélectricité, ...

À cette occasion, Hydro 21 a noué des relations

suivies avec un grand nombre d'acteurs académiques et industriels ayant une forte expertise sur les questions énergétiques. Nous avons sollicité ces acteurs pour présenter un point de vue sur les évolutions de l'hydroélectricité à l'horizon d'une dizaine d'années. Les débats retracés ici portent sur la place de l'hydroélectricité dans le mix électrique, la politique énergétique de l'Union Européenne, la



Barrage de Serre Ponçon, ©EDF - Popy Xavier

gestion de l'intermittence et l'apport de la flexibilité. On aborde également le régime des concessions, les marchés dans les pays émergents, la place de l'innovation et celle du cluster de l'arc alpin. Ces diverses contributions sont proposées par un panel d'experts indépendants apportant conseil et soutien à Hydro 21 dans sa démarche de promotion de l'hydroélectricité, de structuration des acteurs et

de création de synergies entre ces acteurs.

Par ailleurs, Hydro 21 soutient fortement toutes les initiatives visant à favoriser la diffusion de la culture scientifique et technique et en particulier le développement de l'encyclopédie de l'énergie dont les principaux articles portant sur l'hydroélectricité sont donnés à la fin de cette 2^{ème} partie.

PLACE ACTUELLE ET PERSPECTIVES DE L'HYDROÉLECTRICITÉ DANS LE MIX ÉLECTRIQUE

À l'opposé de quelques idées fausses, l'hydroélectricité n'est ni une composante mineure des mix électriques ni une filière du passé sans avenir. A l'échelle mondiale, ses plus de 4 000 TWh représentent 16% de la production d'électricité, soit presque 3 fois la contribution de toutes les autres sources renouvelables réunies (éolien, solaire, géothermie, biomasse et déchets). En Europe, cette contribution est de 12% en France, mais de 15% en Espagne et en Italie, de 58% en Suisse et de 96% en Norvège !

Au cours des prochaines décennies, la production hydroélectrique va continuer à croître aussi bien dans les économies émergentes d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine qui disposent d'un énorme potentiel exploitable que dans les économies matures où la réhabilitation des anciens aménagements et la recherche de moyens de stockage pour faire face à l'intermittence de l'éolien et du solaire jouent en sa faveur. Aux termes des scénarios (2040) de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), le parc hydroélectrique mondial devrait grimper de 1 270 GW en 2017 à plus ou moins 2 000 selon les hypothèses. Les industries électromécaniques brésiliennes, indiennes et chinoises s'y préparent. Il serait dommage que la France ne mobilise pas ses nombreuses compétences pour y prendre part...



Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX
Économiste et Président d'Honneur
de Hydro 21

En 2017, les 4 000 TWh issus des aménagements hydroélectriques ont représenté 16% de la production mondiale brute d'électricité de 25 700 TWh, y compris le pompage-stockage, loin derrière la thermoélectricité (67,9%) mais devant le nucléaire (10,4%) et l'ensemble des autres sources renouvelables que sont la géothermie, l'éolien, le solaire, la biomasse et les déchets (5,7%)¹. Cette part est moins élevée dans les économies industrialisées (13,3%) que dans les économies émergentes (19,1%), l'écart continuant à se creuser car les rythmes de croissance depuis 2010 diffèrent sensiblement : 0,2% par an dans les premières contre 4,2% dans les secondes².

Dans ce cadre mondial, la production hydroélectrique de l'Europe (OCDE) s'est élevée à 610 TWh en 2017 soit un peu moins qu'en 2016 pour des raisons climatiques, les productions d'Espagne et du Portugal notamment ayant été très affectées par la sécheresse. Sur ces productions brutes, le pompage-stockage représente 32 TWh. Mis à part une dizaine de TWh fournis par des auto-producteurs, toute l'électricité est écoulee sur les réseaux.

Quelles sont les perspectives mondiales de l'hydroélectricité à l'horizon 2040 ?³ Dans son New Policy Scenario (NPS), l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) anticipe une production électrique mondiale de 40 400 TWh dont 6 200 issus d'aménagements hydroélectriques, soit 15,3%. Cette quasi-stabilité sur la période 2017-2040 résulte d'un remplacement des centrales thermoélectriques, fermées pour vétusté ou volonté de décarbonation du bilan énergétique, par de l'éolien et du solaire photovoltaïque plus que par de l'hydraulique. La part de cette dernière devrait donc reculer de 16 à 15% dans le parc mondial de production électrique mais ses capacités installées continueraient à progresser de 1 270 GW en 2017 à 1 800 ou 2 000 GW en 2040 selon les scénarios.

En Europe, la croissance de la production hydroélectrique attendue en 2040 est moindre qu'à l'échelle mondiale, soit 775 TWh (NPS), voire 820 TWh, si tous les pays adoptaient des politiques de développement soutenable. Dans les deux cas, sa contribution serait toujours de l'ordre de 16%, obtenue

1. International Energy Agency (IEA). Electricity Information 2018, p. VIII.

2. Économies industrialisées et émergentes correspondent aux catégories statistiques OCDE, non-OCDE.

3. IEA. World Energy Outlook 2018.

par des capacités de production hydroélectrique passant de 245 à 277 ou 290 GW.

D'un côté, cette croissance est limitée par la raréfaction des sites équipables qui augmente les coûts de l'hydraulique face à la rapide baisse de ceux de l'éolien et du solaire à qui sont promis 80% des 880 GW nécessaires entre 2017 et 2040 pour remplacer les centrales thermiques classiques et nucléaires hors d'âge. De l'autre, elle est soutenue par la reconnaissance du rôle essentiel de l'hydraulique dans la nécessaire flexibilité des systèmes électriques. En 2017, parmi les moyens qui l'ont assurée, la part de l'hydraulique a été estimée à 28%, non compris les 4% du pompage-stockage. Compte-tenu de l'appel accru aux sources renouvelables intermittentes et au recul de la thermoélectricité, ce

rôle ne peut que croître⁴.

L'hydroélectricité n'est cependant pas appelée à croître également dans tous les pays d'Europe car leurs capacités installées en 2017 et leurs possibilités de développement sont très différentes. En s'appuyant sur le scénario moyen de Shared Socioeconomic Pathway (SSP), le modèle Pôles a effectué une simulation des croissances attendues dans chaque pays d'Europe. Ses principales hypothèses sont les croissances démographiques et économiques attendues par chacun au cours des prochaines décennies ainsi que les coûts des investissements de chaque type d'aménagement hydraulique (fil de l'eau, lac ou STEP) ainsi que ceux de leurs principaux concurrents (nucléaire, solaire PV, éolien).

TWh	2015	2040	2050	TCAM* 2015-2050 (%)
Union Européenne 28	369	387	404	0,3
Norvège	126	129	131	0,1
Suède	69	70	71	0,1
France	56	56	60	0,2
Italie	48	57	60	0,6
Autriche	39	39	39	0,0
Espagne	34	38	44	0,7
Balkans (Serbie, Croatie, Slovénie...)	29	42	47	1,4
Allemagne	26	32	34	0,8
Roumanie	17	18	18	0,2
Portugal	15	15	15	0,0
Finlande	15	15	16	0,2

* TCAM = Taux de croissance annuel moyen

Les résultats de cette simulation pour l'Union Européenne et les plus importants de ses Etats membres, auxquels ont été ajoutés la Norvège et les pays balkaniques, sont les suivants :

Dans l'ensemble, les trajectoires de croissance de la production hydroélectrique en Europe sont peu pentues, mais elles le sont un peu plus dans les pays balkaniques, en Espagne et en Italie. Pour passer de ces indications à une véritable évaluation des perspectives d'investissement dans chaque pays, il

faudrait examiner plus précisément :

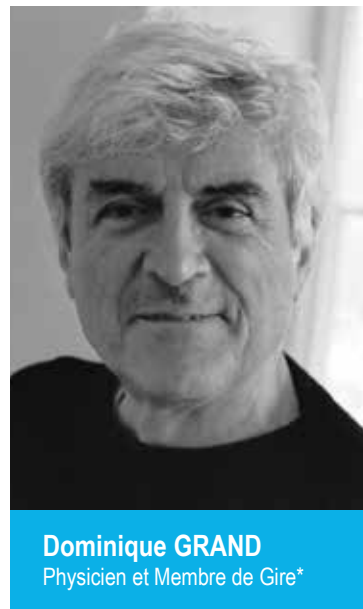
- Le volume que pourrait fournir en 2040 la petite hydraulique, lequel était estimé en 2015 à 12 TWh en Italie et en Allemagne, à 9 en Norvège, à 7 en France et en Suisse ;
- La contribution possible des STEP ;
- La part de la production attendue d'une réhabilitation d'ouvrages anciens. ■

4. IEA. World, op. cit, p. 362-370.

LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE DE L'UNION EUROPÉENNE ATTEINT-ELLE SES OBJECTIFS ?

L'Union Européenne est en passe de manquer l'objectif de réduction des émissions de CO₂. Avec une population légèrement croissante dont la consommation individuelle d'énergie baisse peu, cet objectif ne peut être atteint qu'en diminuant l'empreinte carbone de l'énergie (en réduisant la masse de CO₂ émise par unité d'énergie consommée). Pour remplacer les énergies fossiles, l'UE a investi massivement dans la voie des renouvelables. L'éolien et le solaire ont reçu la quasi-totalité des 407 G\$ de financements depuis 2004.

Contrairement à une opinion répandue, ceci n'a pas diminué l'empreinte carbone. En effet, l'empreinte baissait régulièrement avant 2004. Pire, depuis cette date, la baisse s'est ralentie malgré la multiplication des installations éoliennes et solaire et le ralentissement est le plus net en Allemagne où ces installations foisonnent. Aussi, faudrait-il reconsidérer les choix des investissements visant à diminuer l'empreinte carbone. L'intermittence (voir article suivant) de l'éolien et solaire étant la cause très probable de l'échec actuel, la priorité devrait porter sur le pilotage des sources d'énergie non émettrices de CO₂.



*(Groupement Indépendant et Rationnel sur l'Énergie)

Dans le pacte énergie-climat initié en 2008 et révisé en 2014, l'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de 40% entre 1990 et 2030. La consommation d'énergie doit suivre au moins cette baisse puisqu'elle génère plus des trois quarts des émissions à cause des combustibles fossiles. Le pacte énergie-climat comprend deux objectifs supplémentaires. D'abord d'améliorer de 27% l'efficacité énergétique, ce qui devrait baisser d'autant la consommation énergétique pour un service final inchangé. Ensuite de porter la part d'énergies renouvelables à 27% du mix énergétique seul moyen officiellement promu par l'UE pour baisser les émissions de CO₂. A ce titre les énergies renouvelables ont reçu 407 milliards de dollars d'investissements depuis 2004. Mais, ce sont surtout l'éolien et le solaire photovoltaïque qui en ont bénéficié, recevant en 2016 jusqu'à 95% des investissements¹.

Avec ces moyens financiers, l'UE réduira-t-elle en 2030 ses émissions de CO₂ de 40% par rapport à 1990 ? Essayons de répondre à cette question au vu des résultats actuels. La population européenne croissant très légèrement, un premier moyen serait de baisser la consommation d'énergie par habitant.

Or celle-ci a très peu baissé en moyenne dans l'UE: la consommation individuelle d'un habitant de l'UE en 2016 vaut 98% de celle de 1990². Ce qui est gagné en efficacité énergétique est rattrapé par l'augmentation du niveau de vie et au final la consommation individuelle baisse peu.

Pour réduire les émissions de CO₂, il ne reste alors qu'une possibilité : diminuer l'empreinte carbone de l'énergie dépensée, le taux de CO₂ émis par unité d'énergie. Cela s'obtient en remplaçant les énergies fossiles des transports et du chauffage par des sources d'énergie à faible empreinte carbone comme celles utilisées en production d'électricité : renouvelables (hydraulique, éolien et solaire) et nucléaire. L'examen des résultats du quart de siècle écoulé amène une bonne nouvelle et une mauvaise.

La bonne nouvelle est que l'empreinte carbone a effectivement sensiblement baissé, de 23% de 1990 à 2016. Grâce à quoi ? Serait-ce grâce au développement des renouvelables, éolien et solaire, comme on l'entend souvent? Rien n'est moins sûr car vient la mauvaise nouvelle : l'empreinte carbone baissait plus vite avant 2004, avant que le mix électrique de l'UE contienne une part significative de productions

1. Rapport ONU-UNEP Global trends in renewable energy investment 2018 cité dans la lettre « Géopolitique de l'électricité » n°84 (mai 2018).

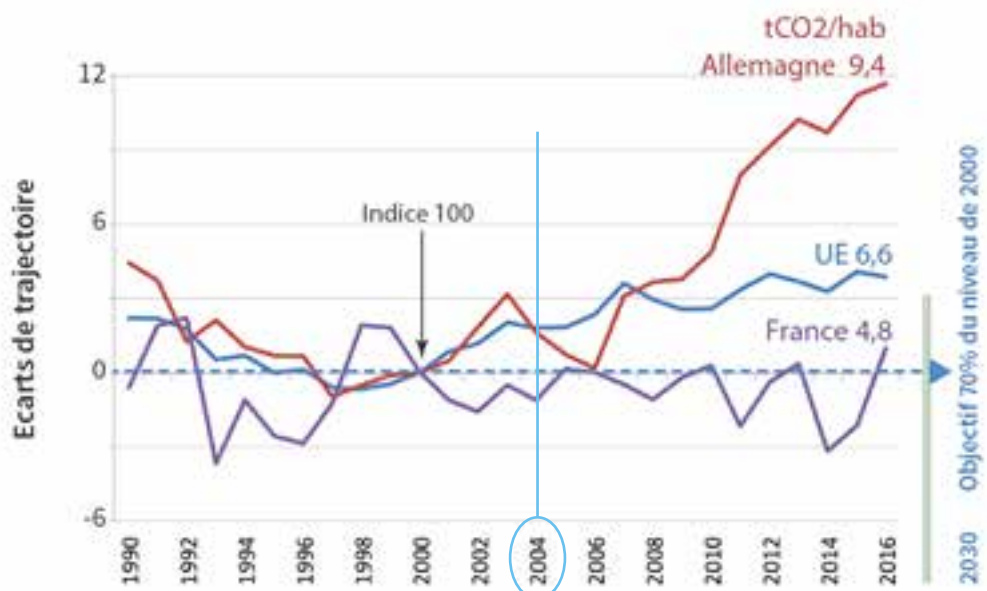
2. Source données d'Eurostat.

éoliennes et solaires. Si le rythme de baisse d'avant 2004 s'était poursuivi, l'empreinte carbone en 2016 aurait baissé de 27% par rapport à 1990, mieux que la baisse de 23% observée.

Ceci doit donc remettre en question l'opinion couramment admise que le développement des énergies renouvelables est « bon pour le climat ». Il peut l'être

à condition de trouver une solution à l'intermittence de l'éolien et du solaire qui n'a manifestement pas été trouvée dans l'UE jusqu'à présent. Le graphique suivant explicite ce constat en montrant les évolutions de l'empreinte carbone de 1990 à 2016 pour l'UE ainsi que pour l'Allemagne et la France.

Il y a une grande diversité des empreintes carbone



Dérive par rapport à la réduction de l'empreinte carbone qui prévalait avant 2004 et l'investissement massif en éolien et solaire PV

suivant qu'on habite en France ou en Allemagne (du simple au double), la moyenne de l'UE étant entre les deux (voir chiffres à droite des courbes). Le graphique présente la dérive des empreintes carbone par rapport à la trajectoire de baisse de l'UE d'avant 2004. Les empreintes carbone sont normées à 100 en 2000, pour une meilleure comparaison des tendances quels que soient les niveaux. L'ordonnée est l'écart à la droite de régression qui représente la baisse de l'empreinte de l'UE avant 2004 avec un bon coefficient de confiance de 96%. Un pays qui suivrait parfaitement la tendance moyenne de l'UE d'avant 2004 parcourrait l'axe horizontal. Un déplacement vers le bas marque une amélioration de l'empreinte CO₂, un déplacement vers le haut une aggravation. L'Allemagne dérive nettement vers le haut, aggravant ses émissions depuis 2000, en oscillant au début puis en accentuant la dérive par la suite. L'UE suit avec une dérive croissante depuis 2000. La France est restée alignée sur cette tendance jusqu'à 2016.

Ainsi l'Allemagne enregistre la plus forte aggravation

de son empreinte carbone depuis qu'elle a déployé massivement l'éolien et le solaire, l'UE suit cette tendance de façon atténuée, et la France souvent critiquée pour prendre du retard dans le développement de l'éolien et du solaire garde la meilleure trajectoire, celle qui permettrait d'atteindre l'objectif de réduction de 40% des émissions de CO₂ en 2030. Ces résultats contrarient peut-être une opinion répandue mais ils s'expliquent bien par la difficulté posée par l'intermittence. Développer ces sources sans mettre en place des moyens pilotables à faible empreinte carbone qui régulent leur production intermittente, conduit à se rabattre sur les centrales à combustibles fossiles flexibles et par suite à augmenter les émissions de CO₂. Avec un parc hydraulique plus important que l'Allemagne et un développement plus limité des ENR intermittentes, la France a évité cet écueil. Pour l'avenir, il faut privilégier le développement des sources pilotables à faible empreinte carbone. ■

3. IEA. World, op. cit, p. 362-370.

L'APPORT DE L'HYDROÉLECTRICITÉ POUR LA SÉCURITÉ DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE ET LA GESTION DE L'INTERMITTENCE

Accroître la part des énergies renouvelables intermittentes dans la production électrique amène de fortes contraintes sur la gestion du réseau électrique que l'hydroélectricité va pouvoir aider à gérer. Dans l'hypothèse de la transition énergétique, 35% de la production électrique annuelle devra être d'origine intermittente et nous en avons calculé les conséquences principales.

Un quart de la production éolienne et photovoltaïque n'est pas utilisable directement et devra être déplacée, stockée ou perdue. Les besoins de stockage seront de 15 TWh pour l'énergie et de 50 GW pour la puissance, valeurs très supérieures à l'existant. La puissance garantie, à laquelle pourrait faire appel le gestionnaire du réseau pour suivre les appels de consommation, est nulle pour le solaire PV et ne dépasse pas quelque pour cent de la puissance éolienne installée. Les transitoires de puissance à gérer de façon journalière ont des pentes dépassant la dizaine de GW en quelques heures. La flexibilité déjà bien utilisée de l'hydroélectricité, si elle continue à être gérée de façon centralisée, fournira une réponse bien adaptée mais malheureusement limitée aux contraintes mentionnées plus haut. Les capacités de stockage de l'hydraulique additionnent les capacités des STEP et celles de la modulation des « barrages lacs » mais sont au moins un ordre de grandeur en dessous des besoins et elles devront être développées et soutenues.



Christian LE BRUN
Physicien et Membre de Gire*

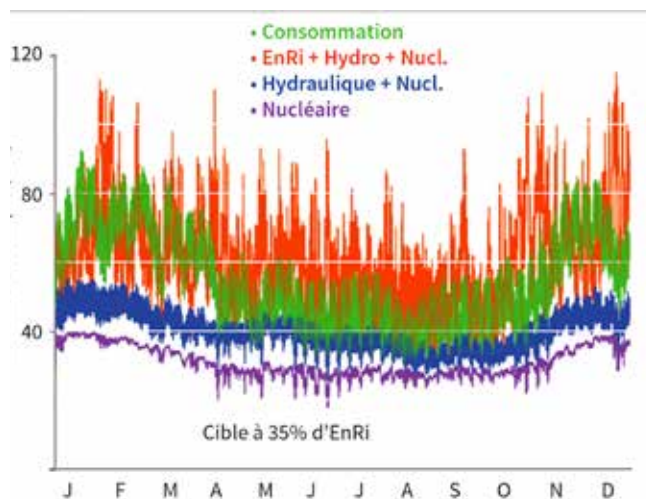
*(Groupement Indépendant et Rationnel sur l'Énergie)

La question essentielle concernant l'utilisation massive d'énergies renouvelables intermittentes dans la production électrique est la gestion de cette intermittence pour répondre à tout instant aux besoins des utilisateurs et garantir la stabilité du réseau. Leur production suit en effet un rythme imposé par la nature différent des besoins des consommateurs. Il est possible d'obtenir une bonne évaluation des contraintes à traiter par une simulation mise au point et utilisée par F. Wagner¹ pour l'Allemagne et reprise pour la France par le groupe GIRE. Elle utilise, pour un pays, les données complètes, enregistrées sur une année de la consommation et des différentes productions. On peut alors, en modifiant les quantités globales produites annuellement par les diverses sources et en gardant les variations temporelles de ces productions, simuler pour chaque instant les conséquences pour divers mix électriques. Nous allons regarder, pour la France, ce que donne cette méthode en appliquant les hypothèses de la transition énergétique prévue par la loi LTECV. Les données de départ (quantités et variations temporelles) sont celles de l'année 2013 pour la consommation et les productions; la consommation est gardée inchangée, la production nucléaire est ramenée à 50% de la production

annuelle totale, les productions fossiles sont mises à zéro, l'hydraulique et la biomasse restent sans changement, les productions annuelles solaires et éoliennes sont multipliées (en gros par 10) de façon à ce que leur production annuelle représente 35% de la production totale. La figure présente la variation temporelle de la consommation et la variation temporelle de la somme des productions hydraulique, nucléaire et renouvelables additionnées chaque demie heure. Les fluctuations de la production sont largement supérieures à celles de la consommation et le réseau devra avoir les moyens de faire coïncider les deux courbes (verte et orange).

En comparant les résultats de cette étude et des études faites sur des mix électriques variés, à partir de productions renouvelables intermittentes d'années et de pays différents, nous avons pu constater un bon accord entre les résultats en pourcentage et repérer l'apparition de trois difficultés majeures lorsque la part d'énergie renouvelable intermittente est supérieure à 20% de la fourniture totale :

- La puissance de production à installer est trois fois plus importante qu'avec des moyens classiques pour obtenir la même production annuelle. Pourtant cette



Mix électrique 50% nucléaire et 35% renouvelables intermittente

puissance ne donne aucune garantie de fourniture à certaines heures (absence de soleil la nuit et absence de vent possible à tout instant). Les installations doivent donc toujours être doublées d'installations pilotables capables d'assurer la totalité de la puissance appelée à tout moment.

- La production intermittente dépasse souvent la demande si bien que 25% de la production, soit 44 TWh, fournie par les énergies renouvelables ne pourra pas être utilisée directement. L'électricité devrait être stockée afin d'alimenter de la même quantité les périodes où la production ne suffit pas à la demande. Le stockage devrait avoir une réserve d'énergie de 15 TW h et une puissance de 50 GW, largement supérieures à ce qui existe actuellement. Sa réalisation demanderait des moyens techniques, matériels et économiques qui ne seront pas réunis avant longtemps. L'ajustement temporel de la demande pour qu'elle coïncide mieux avec la production ne pourrait satisfaire qu'une faible partie du besoin.

- Les transitoires entre surplus et déficit de production sont très fréquents (autour de 1,5 fois par jour) et présentent souvent des pentes supérieures à plusieurs GW par heure. Là encore les moyens techniques de gestion de tels transitoires ne sont pas disponibles à court et même moyen terme sans de vraies ruptures technologiques.

Pour aider à gérer ces trois difficultés, l'hydroélectricité qui contribue déjà beaucoup à la gestion de la stabilité du réseau, devra faire encore mieux car la demande est beaucoup plus importante que les pos-

sibilités actuelles. Pour la sécurité de la puissance à mettre sur le réseau, l'hydroélectricité bien gérée pourra contribuer au mieux pour un quart des besoins. Pour le reste, il faudra faire appel au nucléaire si sa puissance disponible reste suffisante, ou au gaz et émettre des GES supplémentaires. Le stockage offert actuellement par les STEP est très inférieur aux besoins (plus d'un facteur 10 en puissance et encore plus en énergie) et ne répond pas aux besoins de stockage saisonnier. La souplesse des productions hydroélectrique pour la mise en service ou l'arrêt de production nécessaires pour suivre les brutales variations de puissance des énergies renouvelables apportera une contribution essentielle. Il est clair que, si l'hydroélectricité aide déjà beaucoup à gérer la variabilité des énergies renouvelables et de la consommation, son rôle ne fera que croître lorsque la contribution de ces énergies renouvelables sera augmentée mais deviendra malheureusement insuffisante. Les évolutions actuelles vers une plus grande souplesse de conduite avec les puissances variables pourront être pleinement utilisées. Pour que cette contribution soit la plus efficace, elle devra bénéficier d'une gestion la plus centralisée possible pour anticiper les transitions rapides.

L'examen des situations allemandes, australienne du sud et californienne montre que, pour l'instant, le développement important de la production électrique par les énergies renouvelables intermittentes, soulève des problèmes (black-out, renchérissement du coût de l'électricité, vente à prix négatifs) mais n'apporte pas de progrès marquant dans la diminution de la production de CO₂. La France n'a pour l'instant guère de soucis avec l'émission de CO₂ dans la production d'électricité. Dans ses projets de transition énergétique, elle devrait donc agir en priorité dans les transports et le bâtiment, comme l'ont montré les chiffres du suivi de la stratégie bas carbone. La cour des comptes vient de publier un rapport complet sur les politiques publiques de soutien aux énergies renouvelables et signale qu'un tel rapport devrait être complété par des études sur d'autres aspects de cette énergie tels que la variabilité et les potentialités de stockage. ■

1. GRAND (D.), LE BRUN (C.), VIDIL (R.) et WAGNER (F.) Electricity production by intermittent renewable sources: a synthesis of French and German studies Europ. Phys. J. Plus (2016) 131: 3

ANALYSE SYSTÈMES ET HYBRIDATIONS ÉNERGÉTIQUES : FLEXIBILITÉ DÉCARBONNÉE ET HYDROÉLECTRIQUE

Une technologie énergétique se juge par son intégration dans le système d'ensemble de l'énergie, avec l'ensemble des contraintes induites sur les réseaux énergétiques, et l'ensemble de son cycle de vie. Sur les réseaux électriques, les contraintes sont : (1) d'équilibrer la production et la consommation à tout instant, besoin accru avec un apport croissant d'énergies intermittentes, (2) de tenir compte de la réalité spatiale et temporelle dynamique du réseau : équilibre de la fréquence, réalité des acheminements, respect des tensions.

Tout cela implique, au-delà du pilotage accru des consommations, un besoin de stockage et/ou une croissance corollaire de puissances pilotées : on parle de « flexibilité ». Une autre flexibilité importante est le croisement de vecteurs (électricité, chaleur, gaz). L'hydroélectricité, principale ressource renouvelable, sera un outil de choix parmi les flexibilités, et devra évoluer techniquement en hybridation accrue avec les multiples autres solutions, à l'échelle nationale, comme à l'échelle locale pour la petite hydraulique. Compte tenu de la très grande durabilité des installations, l'hydraulique bénéficiera d'une excellente évaluation dans les analyses de cycle de vie.



David FRABOULET
Physicien Ingénieur CEA Grenoble

L'HYDRAULIQUE POUR LES SERVICES RÉSEAUX

La structure des réseaux électriques combine 3 étages : (i) le grand transport (à Haute tension), nous connectant d'ailleurs à nos voisins Européens ; (ii) la répartition régionale puis une répartition étoilée, sur laquelle sont connectés quelques grands consommateurs, et enfin (iii) le réseau basse tension, alimentant l'essentiel des clients, ainsi que collectant l'essentiel des nouvelles productions délocalisées renouvelables intermittentes. Les **raisonnements « plaque de cuivre »** ignorent cette **réalité pratique** du fonctionnement du réseau. Il y a donc le besoin de stockage et de puissances de production pilotables à la demande, afin de satisfaire les grands équilibres à l'échelle d'un pays. Mais il y a aussi le besoin d'équilibre dynamique du réseau. Parmi les « services » requis, celui d'inertie en cas de variation rapide de l'équilibre permet un retour sans trop forte excursion de fréquence. Les **machines électro-génératrices tournantes**, comme celles des **ouvrages hydro-électriques** apportent naturellement une telle **inertie électromécanique**.

L'HYDRAULIQUE SOURCE PILOTABLE DÉCARBONNÉE

Avant le stockage, et le pilotage des consommations, la première et naturelle flexibilité pour l'équilibrage des réseaux est le recours à des sources électriques pilotables à la demande. Pour cela, les centrales à gaz constituent la référence internationale compte tenu d'une grande capacité de manœuvrabilité (jusqu'à 20% de variation de puissance nominale par minute) d'une part, et d'un investissement capitalistique initial qui facilite leur fonctionnement partiel en complémentarité de sources intermittentes, ces dernières n'étant pas pilotables en dehors de l'enveloppe de disponibilité de leur source initiale (vent ou soleil). En France, le nucléaire, même s'il est de manœuvrabilité réglementairement plus réduite (5 % de variation de puissance par minute), reste la flexibilité la plus importante, compte tenu d'un large parc de réacteurs. La biomasse pourrait également servir de source en partie pilotée, mais son bilan carbone complet est débattu, et ce sera une ressource limitée en grands conflits d'usages. A l'aune de cette concurrence des flexibilités électriques, l'**hydraulique** fait figure de **production pilotable mature**, et

d'**excellent bilan carbone**, y compris sur un cycle de vie complet.

L'HYDRAULIQUE STOCKAGE D'ÉLECTRICITÉ

Aujourd'hui, l'hydraulique est le seul mode de stockage d'énergie électrique sur les réseaux, avec 4.9GW disponibles en France, pour un volume énergétique de 0.1TWh, volume à comparer aux 1 à 2 TWh de consommation nationale quotidienne. Demain, de nouveaux stockages vont voir le jour avec par exemple les systèmes électrochimiques (batteries). Ainsi une flotte de 2 millions de VE (horizon 2030) supposés connectés au réseau et y mettant chacun 20kWh à disposition représenterait 40GWh, soit presque la capacité de la STEP de Grand Maison (54GWh). Avec ses avantages initiaux intacts, Il faudra que l'hydraulique sache s'améliorer et se positionner en complémentarité avec ces nouvelles technologies de stockage.



Multiples composantes d'un système énergétique hybride : électricité, chaleur, gaz, intégrant de multiples flexibilités coté production, consommation, stockage.

L'HYDRAULIQUE ET LE CROISEMENT DE VECTEURS ÉNERGÉTIQUES

Demain, le stockage d'électricité impliquera aussi potentiellement des changements de vecteur énergétique, vers la chaleur ou vers le gaz, comme dans le cas de l'électrolyse hydrogène, et des gaz synthétiques dérivés. Comme ces autres formes d'énergie sont également utilisables par les clients, et pour éviter les pertes de rendement liées à de changement de forme d'énergie, il sera souhaitable de favoriser la consommation de l'énergie sous sa forme stockée (sauf exceptions de conjoncture de marché). Un couplage plus fort devrait apparaître entre les différents réseaux énergétiques : électrique, chaleur

et gaz. Ceci sera a fortiori pertinent à des échelles locales ou régionales, échelles plus naturelles des réseaux de chaleur, et peut être aussi des nouveaux réseaux de gaz aptes à absorber sans requalification fastidieuse la production de gaz hydrogène. Les capacités de **stockage gaz actuels sur le territoire (plus de 120TWh)** justifient l'intérêt de principe d'une telle conversion électricité vers gaz, même pour des rendements de conversion médiocres. Pour la petite hydraulique, sur de nombreux projets considérés non rentables par le passé, il faudra revoir les équations économiques compte tenu de la nouvelle conjoncture, et de coûts (système) des solutions concurrentes aussi nettement à la hausse.

De nouveaux développements pour des croisements de vecteurs énergétiques seront également possibles. Par le passé en France, le nucléaire et l'hydraulique ont été développés en co-optimisation sur les réseaux électriques. Demain, cette co-optimisation devra inclure aussi de nouvelles sources de production, de nouvelles technologies de stockage et de pilotage, notamment grâce aux nouvelles technologies numériques, et s'intégrer sur de multiples réseaux d'énergie.

DES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION SIGNIFICATIVES POUR LA FILIÈRE HYDRAULIQUE EN FRANCE

Si l'énergie hydraulique a été la première sur les réseaux électrique, c'est loin d'être une énergie du passé. Ses atouts initiaux restent là, mais des **développements technologiques nouveaux** seront nécessaires afin d'adapter les technologies du passé à de nouveaux défis en réponse aux nouveaux besoins de flexibilité: variations de puissance de profondeur et de vitesse accrue en pompage comme en turbinage, intégration de pilotages numériques, reprises d'études pour la plus petite hydraulique, dans une logique **d'hybridation avec les technologiques concurrentes**. Des optimisations globales du système énergétique seront recherchées, bien ancrées sur des **analyses de cycle de vie** dans lesquels **l'hydraulique aura de sérieux atouts**.

Ceci, avec un savoir-faire histoire en France, constitue un **joyau industriel** tant pour la **transition énergétique décarbonée** nationale que pour rayonner avec une **ambition compétitive à l'export** pour des systèmes énergétiques complets multi-composantes, bien adaptés à la réalité de chaque client international. ■

LA DIFFICILE RÉFORME DU RÉGIME DES CONCESSIONS HYDROÉLECTRIQUES

Le débat sur le renouvellement des concessions qui dure depuis 2008 a été initié par une demande de la Commission européenne de mise en conformité du régime des concessions avec la directive sur les marchés publics dans plusieurs pays. Il s'agit de mettre en concurrence les concessions hydroélectriques, actuellement en possession d'EDF et de la CNR du groupe Engie, avant même leurs échéances à 75 ans.

Il a fallu attendre la loi de transition énergétique de 2015 pour que des aménagements soient apportés pour préserver deux éléments importants : l'efficacité de gestion du système hydroélectrique français, en permettant le regroupement de lot de concessions par bassins et fleuves, et le caractère de bien public de gestion des fleuves par les barrages, en ne permettant l'attribution des concessions qu'à des sociétés d'économie mixte impliquant les collectivités territoriales. Bien que les décrets aient été pris récemment, la Commission européenne vient de demander en 2019 de nouveaux aménagements à la France, comme d'ailleurs à sept autres pays européens.



Dominique FINON
Économiste CNRS* - Grenoble

*(Centre National de Recherches Scientifique)

L'hydroélectricité est réglementée par l'État depuis la loi de 1919 qui fait une distinction entre le régime de l'autorisation pour les centrales d'une puissance inférieure à 4,5 MW et le régime de concessions pour les centrales au-dessus de 4,5 MW. La loi de nationalisation de l'électricité de 1946 a confié les concessions existantes à EDF, à l'exception des équipements de la SNCF. La plupart des concessions ont été et sont attribuées pour une durée de 75 ans. À l'issue de cette période, les biens en concession font retour à l'État qui peut renouveler la concession ou l'attribuer à un autre opérateur. Ces dernières appartiennent en droit à l'État et sont exploitées par un concessionnaire pour son compte, qui peut continuer d'investir pour moderniser et accroître la puissance de l'équipement. Aujourd'hui, deux acteurs se partagent la production effectuée par les grandes centrales : EDF, avec 75 % du parc 18,4 GW dont les 5 GW de station de pompage), et Engie, qui produit 25 % de l'hydroélectricité française avec la Compagnie nationale du Rhône (CNR) et la Société hydro-électrique du Midi (anciennement propriété de la SNCF), et qui gère 5 GW.

Le débat sur le renouvellement des concessions dure depuis de longues années. Il a été initié par une demande formulée en 2008 de la Commission européenne de mise en conformité du régime des

concessions avec la directive sur les marchés publics qui régit, entre autres, le régime des concessions de divers types. Du côté français, le renouvellement des concessions à 75 ans devait se faire de façon naturelle en les maintenant à EDF et à la CNR, d'autant que l'un et l'autre avait construit l'essentiel des équipements de 1945 à 1980, et que leur mode d'organisation intégrée permettait de gérer de façon cohérente les barrages d'une même vallée.

Mais l'injonction de la Commission européenne à la libéralisation du régime contraindrait le gouvernement à mettre en concurrence l'attribution des concessions à leurs échéances, voire avant leurs échéances. On devine les réticences des premiers concernés et les résistances politiques devant cette mesure qui apparaît clairement comme contraire à l'intérêt commun pour de multiples raisons : primo, placer de nombreux barrages entre des mains privées alors que les barrages ont souvent une fonction d'intérêt public (irrigation, loisirs, pêche...) ; secundo, l'absence d'intérêt de cette concurrence pour faire baisser les prix des consommateurs, car il s'agit d'abord de transférer une source de rente à des concurrents ; tertio, l'absence d'amélioration de l'efficacité d'ensemble du système électrique, avec au contraire la destruction potentielle de la cohérence de gestion des équipements avec la succession d'usines équipant

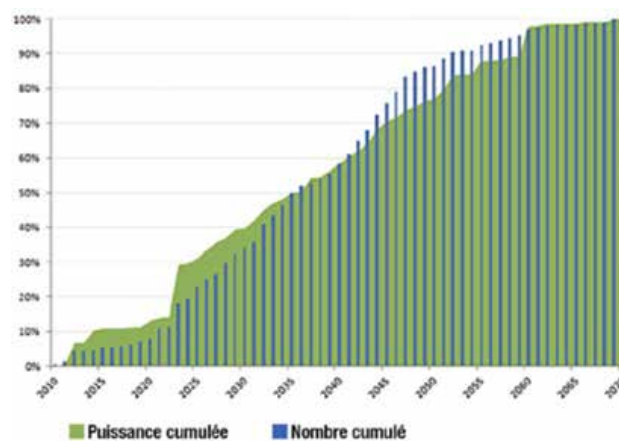
des vallées ou des vallées confluentes qui doivent fonctionner de façon coordonnée en « train d'eau » descendant la vallée.

Il a fallu attendre la loi de transition énergétique (LTECV) de 2015 et un appel à l'ordre de la Commission européenne en 2015 pour que trois longs articles (116, 117, 118) précisent les éléments qui visent à amortir les effets négatifs de la mise en concurrence des concessions hydroélectriques. Primo, les enchères pourront ne porter que sur des lots d'équipements par vallée ou bassin. Secundo, les candidats devront être des sociétés d'économie mixte dont l'objet est d'exploiter des contrats de concessions sur un équipement qui peut être individualisé, ou sur une vallée. On lit dans la loi de 2015 : « *Cette disposition a pour objectif de mieux associer les collectivités territoriales à la gestion des usages de l'eau, et de renforcer le contrôle public sur le patrimoine commun que constitue le parc hydroélectrique français. Aux côtés des entités publiques (collectivités locales, mais également d'éventuels investisseurs publics), les actionnaires privés sont sélectionnés à l'issue d'une procédure de mise en concurrence, conformément à la législation européenne* ». Un cahier des charges très élaboré a été défini pour tenir compte des diverses sujétions publiques imposables aux exploitants de barrages et préciser les modalités de rénovation et d'amélioration des équipements, ainsi que les règles pour calculer la redevance que les concessionnaires doivent verser à l'Etat. « *Pour toute nouvelle concession hydroélectrique, y compris lors d'un renouvellement, il est institué, à la charge du concessionnaire, au profit de l'État, une redevance proportionnelle aux recettes de la concession. Les recettes résultant de la vente d'électricité sont établies par la valorisation de la production aux prix constatés sur le marché, diminuée, le cas échéant, des achats d'électricité liés aux pompages(...)* ». Le décret relatif aux concessions d'énergie hydraulique et approuvant le modèle de cahier des charges est paru au Journal Officiel le 30 avril 2016. Il précise les conditions du regroupement des concessions lorsque des aménagements sont hydrauliquement liés et doivent être exploités de manière coordonnée. Il établit également la procédure de création de SEM hydroélectriques lors du renouvellement des concessions.

L'accord avec la Commission européenne a été et reste difficile à trouver, car la France vient de recevoir une nouvelle lettre de mise en demeure de la Commission en mars 2019 après celle de 2008

et une autre en 2015, pour faire en sorte que « les marchés publics dans le secteur de l'hydroélectricité soient attribués et renouvelés dans le respect du droit de l'Union européenne ». Au-delà de la lenteur de mise en oeuvre des éléments de la loi, on reprocherait que « la législation et la pratique » des autorités françaises sont contraires au droit de l'UE en autorisant le renouvellement ou la prolongation de certaines concessions hydroélectriques en permettant à EDF de candidater au renouvellement de ses propres concessions, et en faisant en sorte de ne pas le défavoriser. La Commission reproche aussi que « *ne soient pas mises en concurrence des concessions non encore échues* ».

Il est rassurant de constater que, face au culte bruxellois de « la Concurrence pour la Concurrence », la France est loin d'être seule, car la même mise en demeure a été envoyée à 7 autres pays dont l'Allemagne et l'Italie. C'est dire qu'on s'est interrogé dans toute l'Union européenne sur le bénéfice que les consommateurs tireront de la mise en concurrence des concessions, sachant que c'est le seul ressort légitimant la concurrence « coûte que coûte », même dans les textes européens. Mais il faudra bien que chacun s'incline devant l'imperium bruxellois, à moins que... ■



Évolution du pourcentage cumulé des concessions venant à échéance
(Direction Générale de l'énergie et du climat)

L'AFD ET LE DÉPLOIEMENT DE L'HYDROÉLECTRICITÉ DANS LES ÉCONOMIES EN DÉVELOPPEMENT OU ÉMERGENTES

L'hydroélectricité, actuellement première source d'électricité renouvelable dans le monde, constitue une ressource considérable encore très largement sous-exploitée, en particulier dans les pays en développement ou émergents. Soucieuse de valoriser des capacités de production électrique durables et à un coût compétitif, l'Agence Française de Développement (AFD) est de longue date active dans le financement du secteur hydroélectrique, qui fait l'objet d'une demande croissante des pays en développement et émergents.

Dans un contexte de transition énergétique, d'enjeux climatiques et d'innovation dans le secteur électrique, l'hydroélectricité présente des atouts importants : diversité de la ressource et complémentarité entre petite et grande hydroélectricité, complémentarité entre l'hydroélectricité et les énergies renouvelables intermittentes, intelligence et flexibilité opérationnelle accrues. À condition de bien traiter les enjeux environnementaux et sociaux et de s'attacher à anticiper les effets du changement climatique dans la conception et l'exploitation des ouvrages.



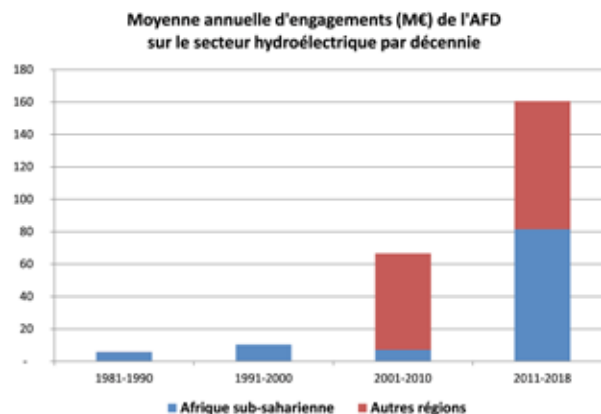
Sébastien CARREAU
& Christian DE GROMARD
Agence française de développement

De par sa maturité technologique, l'hydroélectricité constitue un moyen de production très compétitif d'énergie. C'est actuellement la première source d'électricité renouvelable dans le monde (4100 TWh) et sa part dans la production électrique mondiale totalisait 16% en 2017 (source AIE).

Les ressources non exploitées dans les pays en développement ou émergents restent considérables. Alors qu'il dispose de 10% des réserves hydrauliques mondiales économiquement exploitables, le continent africain valorise moins de 10% de son potentiel, avec de fortes disparités régionales. L'Afrique centrale par exemple produit plus de 60% de son électricité à partir de l'hydraulique (près de 100% en Centrafrique), alors qu'en Afrique de l'Ouest, son apport est moindre (à peine 1/3 de la production électrique et seulement quelques % dans plusieurs pays sahéliens).

De longue date, l'AFD est active dans le secteur de l'hydroélectricité. Les prêts longs et à taux compétitifs qu'elle peut accorder sont adaptés au financement de ce type de projets. Dans les pays en développement et émergents, l'impérieuse nécessité d'accroître les capacités de production électrique et le prix élevé des hydrocarbures souvent importés suscitent une forte demande sur cette filière, comme

le montre la progression des engagements de l'AFD sur l'hydroélectricité.



La « grande » et la « petite » hydroélectricité sont complémentaires, mais nécessitent des approches et des modes de développement différents :

- **La grande hydroélectricité** permet de fournir la puissance électrique dont ont besoin les grandes métropoles et les entreprises grosses consommatrices. Sa concrétisation dans de nombreux pays notamment africains passe par la structuration d'ouvrages à l'échelle régionale.
- **La petite et moyenne hydroélectricité** offre l'opportunité de nombreux projets de taille limitée mais

à forts impacts locaux. Elle nécessite des approches spécifiques, sous forme de programmes d'équipement, dans lesquels le secteur privé pourrait être plus mis à contribution dans le cadre de PPP, qui reste à développer à l'échelle des États.

Placés sur les grands fleuves transfrontaliers, les ouvrages hydroélectriques « multi-pays » permettent un partage optimal de la ressource et favorisent l'intégration régionale. La structuration financière et le montage institutionnel de ces investissements restent cependant complexes. Du fait de l'importance des montants financiers requis, la plupart des grands projets hydroélectriques africains se font en cofinancements mobilisant plusieurs bailleurs internationaux.

Les composantes environnementales et sociales de ces projets doivent être examinées avec soin. La coordination des moyens et une action concertée des bailleurs sur les politiques de sauvegarde s'imposent pour s'assurer que ces volets environnementaux et sociaux sont traités avec un haut niveau d'exigences.

En la matière, l'AFD s'est dotée de diligences environnementales et sociales spécifiques aux grands barrages. L'AFD s'assure en particulier que les populations locales bénéficient de ces projets par de meilleures conditions de vie et des opportunités économiques accrues. Il s'agit aussi aujourd'hui d'intégrer les dernières avancées pour mieux prendre en compte les volets atténuation et adaptation au changement climatique dans les projets hydroélectriques.

La réhabilitation des ouvrages hydroélectriques existants s'impose maintenant dans de nombreux pays, du fait de l'ancienneté de nombreux ouvrages, notamment dans le continent africain.

Un axe d'intervention devrait croître dans les prochaines années : l'hydroélectricité de moyenne et petite puissance, qui reste sous valorisée dans de nombreux pays du Sud.

Avec l'appui de la Commission Européenne (programme RECP), l'AFD a financé en 2013 une étude sur le développement de l'hydroélectricité en Afrique subsaharienne, ciblée sur les ouvrages de moyenne et petite puissance. La figure jointe donne les résultats de données recueillies pour quelques pays africains représentatifs.

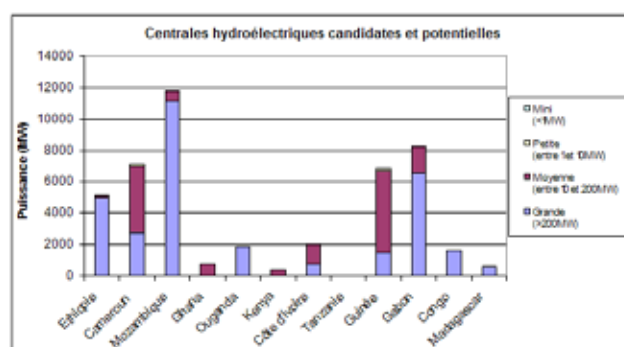
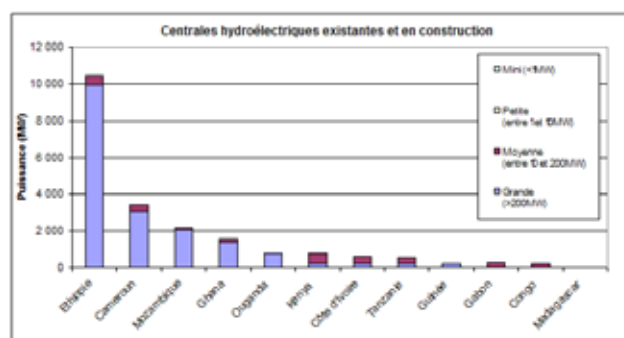
Enfin, à l'instar du secteur électrique en général, la filière hydroélectrique connaît une période d'innovation et de transformation inédite, qui bouscule les pratiques des hydroélectriciens au Nord comme au Sud. Dans un contexte de développement des smart grids, l'introduction de solu-

tions intelligentes permet d'accroître la flexibilité de la contribution des ouvrages hydroélectriques dans les mix électriques. La gestion en temps réel de la ressource et la capacité de stockage des barrages deviennent des atouts complémentaires du déploiement des énergies intermittentes (solaire et éolien), ressources également abondantes et sous-exploitées en Afrique.

Ces évolutions technologiques conduisent à repenser les modes d'exploitation des ouvrages hydroélectriques, afin d'utiliser leurs potentiels de manière plus stratégique et plus économique.

Un autre paramètre concerne l'intégration des effets du changement climatique dans la conception et la gestion des ouvrages. L'imprévisibilité accrue des régimes pluviométriques ou de l'intensité des précipitations appellent à revoir les pratiques du secteur hydroélectrique et posent encore beaucoup de questions sans réponse que de nombreuses recherches et initiatives cherchent à résoudre. L'Association Internationale de l'Hydroélectricité, avec l'appui de bailleurs internationaux, a ainsi entrepris de définir des principes directeurs et un cadre pratique pour mieux prendre en compte les enjeux de résilience climatique des ouvrages hydroélectriques. Ces travaux ont conduit à la publication en mai 2019 d'un premier guide sur la résilience climatique du secteur de l'hydroélectricité. ■

Centrales et potentiels hydroélectriques dans quelques pays africains Étude CE-AFD/Tractebel (2013)



LA PLACE DE L'INNOVATION POUR L'HYDROÉLECTRICITÉ

L'hydroélectricité est un moyen à forte valeur ajoutée pour une gestion intelligente de l'interconnexion des moyens de production et de services au réseau électrique, en assurant par ailleurs un mode de production très flexible et une grande capacité de réserve par la taille des réservoirs et par la possibilité de réguler cette réserve en turbinage pompage. L'innovation s'exprime soit par des projets avec des alliances entre partenaires conservant la maîtrise de leur segment d'activité, pour étudier des projets ambitieux nécessitant du partage des dépenses de R&D, soit par les nouveaux entrants porteurs de solutions pour des améliorations d'usages allant de la micro-énergie à des systèmes embarqués ou ilôtés.

L'innovation technique porte donc tant sur les turbomachines que les systèmes qui lui sont raccordés, les efforts actuels portent sur l'adaptation de l'hydroélectricité à des systèmes multi-énergies, en réseaux isolés ou interconnectés. La réserve hydraulique et l'inertie des turbomachines est un avantage majeur pour l'équilibrage de charge sur le réseau, la numérisation et le contrôle avancé permettent d'exprimer cet atout unique dans une vision globale de régulation de systèmes interconnectés avec des sources d'énergies variables ENR ou plus stable comme le nucléaire.



Claude REBATTET

Grenoble INP
Directeur du CREMHyG

Si nous envisageons l'avenir, la disponibilité et la maîtrise des ressources naturelles telles que l'eau et l'énergie sont un défi majeur. Compte tenu de la hausse de la demande mondiale d'énergie et de la nécessité d'un déploiement plus important, une question majeure est celle du déploiement des infrastructures multi échelles et de l'adaptation aux usages par une plus grande diversité des produits. Le lieu de l'innovation n'est pas uniquement centré sur les technologies mais également sur les usages, l'innovation n'est donc pas concentrée sur la turbomachine mais sur un ensemble de produits qui constituent ensemble un système opérationnel performant et flexible en service au réseau électrique.

Le rôle de l'hydroélectricité dans le mix énergétique est particulier, compte tenu de son avantage en capacité de production et de stockage massifs, mais il est confronté à de fortes contraintes qui concernent l'environnement et les politiques incitatives d'aides sur le solaire et l'éolien. Confronté à l'équilibrage production consommation dans un contexte d'intermittence éolien-solaire, les réseaux isolés tentent de réduire l'usage des énergies fossiles et parfois se tourne vers l'hydraulique pour sa flexibilité et surtout sa prévisibilité. Il existe d'autres marchés plus captifs, celui des énergies perdues ou non exploités, domaine qui encourage l'innovation et entraîne des initiatives pour les développeurs de micro-énergie, lesquels étudient par exemple la ressource hydraulique à faible chute ou la récupération d'énergie sur les conduites. Enfin, l'énergie hydraulique accompagne les concentrations humaines et précaires et

répond aux besoins de premières nécessité, des pico et micro centrales sont en développement dans le monde pour répondre aux besoins en énergie frugale avec une autoconsommation locale. Cette logique se développe également en éco-quartier ou autres pôles de consommation décentralisée.

Les technologies dans le domaine de l'hydroélectricité sont généralement considérées comme matures, ce qui signifie qu'aucune révolution d'innovation (disruption) n'est attendue à court terme. Compte tenu de la technologie actuelle des turbines, c'est par la demande du marché que de nouveaux développements technologiques sont engagés, afin d'améliorer les performances ou dans le but de rénover des aménagements existants, ou d'optimiser par exemple pour améliorer la flexibilité d'usage, ou encore d'avoir une nouvelle offre concurrentielle pour des potentiels non encore exploités.

Aujourd'hui, les rendements des machines hydrauliques sont considérés comme supérieurs à ceux des autres technologies concurrentes, supérieurs à 90% et plus, et pouvant être améliorés dans un domaine élargie par exemple aux faibles et fortes charges. Le démarrage et arrêt des groupes a tendance à être plus fréquents pour de l'équilibrage de charge, la conception de telles machines est un sujet de recherche et de développement, avec une équation complexe à résoudre, avec des paramétrages hydrauliques et électriques autocontrôlés, pour gérer les régimes transitoires.

Comme pour la digitalisation des flux d'information via le réseau Internet, l'innovation porte aussi sur la révolu-

tion numérique de l'Eternet de l'énergie, cela s'explique par le besoin de piloter et de réguler les flux d'énergie en intégrant les sources d'énergies renouvelables dont la production d'électricité est variable. Il faut alors raisonner en maillage de sources interconnectées et de moyens de stockage pour ensuite transporter et distribuer vers les points de consommation. Les flux d'énergie distribués seront ainsi agrégés dans le cadre d'une surveillance intelligente, afin de mieux équilibrer l'offre et la demande et améliorer l'efficacité. À chaque instant, la sécurité et la qualité des services sont mises au défi au sein de systèmes hétérogènes et interdépendants. L'hydroélectricité est un moyen à forte valeur ajoutée pour une gestion intelligente de l'interconnexion des systèmes en assurant un mode de production flexible, une capacité de réserve massive, et la possibilité de réguler cette réserve en cycle de turbinage pompage. Une des améliorations est l'introduction de la vitesse variable pour améliorer le réglage de puissance.

De tous ces acquis sur les qualités de l'hydroélectricité, l'innovation s'est concentrée essentiellement sur la réalisation des ouvrages et l'optimisation d'un aménagement. Chacune des propositions d'offre d'innovation listées ci-dessous montre plusieurs possibilités de développer dans le futur des méthodes, des produits ou de services. Chacune peut faire appel à des alliances entre partenaires conservant la maîtrise de leur segment d'activité pour étudier des projets ambitieux nécessitant le partage des dépenses de R&D et d'expérimentation, elles sont multiples au service d'utilisations diverses, allant de la pratique des loisirs aux besoins d'équipement, d'opération et de maintenance :

- **Faire appel à des matériaux composites** pour la fabrication des conduites forcées avec des avantages liés à la mise en œuvre, à la réduction des coûts tant sur l'investissement que sur la maintenance (capex/opex)
- **Envisager plus d'hybridation** des solutions de stockage pour combiner les avantages de l'hydro et ceux des autres moyens de stockage (Lithium, Hydrogène, Power2gas, Sodium ...) et adapter aux besoins de service
- **Équiper à neuf ou réhabiliter les groupes** en pilotant la vitesse variable de la turbine pour plus de flexibilité de puissance tout en assurant la stabilité en fréquence et tension grâce aux électroniques de puissance
- **Avoir une meilleure prise en compte des besoins de consommation de pointe**, associant tourisme saisonnier et irrigation agricole en été, par la gestion de cycle d'apports par les sources ENR (éolien, solaire) et de soutien par le turbinage/pompage sur des retenues d'eaux gravitaires
- **Introduire des solutions originales**, par exemple des **panneaux photovoltaïques flottants** sur des retenues limitant ainsi l'évaporation des réservoirs de barrage
- **Développer le digital** pour le monitoring hydro pour

une production optimisée et la possibilité d'anticiper des aléas par analyse de signaux faibles (précurseurs)

- **Améliorer la continuité écologique** et faciliter l'acceptabilité de nouveaux projets d'aménagement (préservation des poissons et des écosystèmes plus globalement ...)
- **Réduire les risques, suivre en continu le potentiel hydrique** et améliorer le diagnostic de cycle de vie par l'auscultation des ouvrages par des techniques d'observation et des capteurs intelligents et connectés : drones, robots dans les conduites, transmission RF et par fibres optiques noyées, ...
- **Maîtriser l'évolution de la ressource en temps réel** par l'apport du digital dans l'Hydrométrie: hauteur/débit/vitesse d'écoulement de surface par analyse d'images, par suivi de balises et déplacement des corps flottants
- **Réduire les risques de catastrophes naturelles** par la prévision hydro météo et la gestion des flux des bassins hydriques: anticiper les anomalies de régimes (crues) tout en optimisant la valorisation de la production et en préservant la sécurité par la maîtrise des capacités de réserve
- **Agir sur l'environnement et la maîtrise des fonds des bassins** par l'auscultation faisant appel à des moyens robotiques : maîtrise des masses sédimentaires, suivi des amas de végétaux, estimation de l'impact sur les équipements et les organes de manœuvre
- **Faire appel à la digitalisation et la collecte des données** pour organiser la maintenance prédictive, améliorer la continuité des services et la cohérence des opérations dans un processus de maintenance agile
- **Rendre le contrôle/commande** interopérable à distance en limitant les risques de vulnérabilité par des failles de communication (cybersécurité)
- **Ouvrir des nouveaux marchés de développement à l'international** : saisir les opportunités liées aux besoins en croissance énergétique, en développement social, en apport de technologies et de services, là où les ressources hydro sont sous exploitées : Afrique, Asie... et là où les besoins de stabilité du réseau sont problématiques au développement d'activités et d'infrastructures : Moyen orient, Inde...
- **Développer des produits adaptés** et conditionnés pour des échelles de besoins très variables de la micro à la grande hydraulique : Taille des réservoirs et dimensionnement des groupes en puissance installée, impact environnemental réduit : par exemple par l'introduction de Micro STEP, par des mix de production en zone ZNI et îlots. ■

L'HYDRAULIQUE, UNE ÉNERGIE DONT LA VALEUR TIENT À SA FLEXIBILITÉ ET À SA STOCKABILITÉ

La transition énergétique va favoriser une électricité qui sera de plus en plus décarbonée, décentralisée et digitalisée. L'électricité hydraulique est une énergie renouvelable décarbonée qui a l'avantage sur le solaire ou l'éolien d'être largement "piloteable" puisque l'on peut stocker l'eau dans des barrages de retenue ou recourir à des stations de pompage.

Le stockage et déstockage de l'électricité permet de faire face aux fluctuations de la demande et il se fera demain de trois façons principales: les batteries, le "power-to-gas" (électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène) et le recours au stockage de l'eau. L'hydraulique est aujourd'hui et de loin le principal outil de stockage et cette source permet de produire 12,5% de l'électricité française, certes loin derrière le nucléaire (72%) mais bien devant l'éolien (5%) et le solaire (2%), ce qui lui donne une grande valeur économique.



Jacques PERCEBOIS

Professeur Emérite à l'Université de Montpellier

La transition énergétique va s'accompagner d'un développement massif des énergies renouvelables décentralisées comme le solaire et l'éolien. Ces deux énergies représentent aujourd'hui un montant modeste de la production française d'électricité, 1,9% pour le solaire et 5,1% pour l'éolien (chiffres 2018, source RTE). La structure de la production d'électricité française était en 2018 encore largement dépendante du nucléaire (71,7%) et de l'hydraulique (12,5%). Le reste était fourni par le gaz (5,7%), les bioénergies (1,8%), le charbon (1,1%) et le fioul (0,4%). On a coutume de distinguer les énergies dites « pilotables » comme les centrales thermiques ou nucléaires, que l'on peut appeler lorsque la demande l'exige, et les énergies « non pilotables » (ou intermittentes) comme le solaire et l'éolien, dont la production dépend principalement des conditions météorologiques et pas des besoins du marché. L'hydraulique est parfois « non pilotable » lorsqu'il s'agit d'hydraulique au fil de l'eau (on parle alors d'électricité « fatale ») mais elle est largement « pilotable » lorsqu'il s'agit de barrages de retenue. A défaut de stocker l'électricité, on stocke l'eau ce qui permet de faire face à la demande de pointe.

Les objectifs de la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie) sont ambitieux puisque l'on pré-

voit à la fois une forte baisse de la consommation finale d'énergie, une légère hausse de la consommation finale d'électricité (du fait du développement du véhicule électrique et des objets dits « connectés ») et une forte croissance de la production d'électricité renouvelable. L'ambition est d'atteindre 40% d'électricité renouvelable à l'horizon 2030 (contre 19,5% aujourd'hui si on additionne l'hydraulique, le solaire et l'éolien) et de réduire la part du nucléaire à 50% à l'horizon 2035. Le développement du solaire photovoltaïque va se faire simultanément par le biais de centrales au sol de grande dimension et par celui d'installations sur les toits des bâtiments des secteurs domestique et tertiaire. Pour l'éolien, la tendance est à des installations de moyennes ou grandes dimensions, que ce soit à terre ou en mer. Mais dans tous les cas, la localisation de ces équipements va exiger un renforcement du réseau de distribution voire du réseau de transport d'électricité, le choix des sites étant largement dépendant des conditions géographiques (sites plus ou moins favorables).

Le caractère intermittent de cette production « non pilotable » va accentuer les besoins de flexibilité du système électrique et cette flexibilité est obtenue de trois façons principalement :

- via une flexibilité des moyens dits « pilotables » que

l'on module en fonction des variations de la demande et de la disponibilité technique des installations

- via le recours à des effacements plus ou moins programmés de la demande d'électricité, en particulier aux heures de pointe à des périodes où la disponibilité des centrales solaires est faible voire nulle
- via le stockage et déstockage de l'électricité et c'est là que le rôle de l'hydraulique est aujourd'hui déterminant.

Rappelons que l'électricité ne se stocke pas à grande échelle et que les injections sur le réseau doivent, en temps réel, être égales aux soutirages, tout en tenant compte des pertes en ligne par effet joule. Il existe néanmoins trois moyens principaux de stockage de l'électricité : les barrages de retenue et en particulier les stations de pompage (STEP pour stations de transfert d'énergie par pompage), les batteries et le « power-to-gas ». Les batteries joueront un rôle croissant au fur et à mesure que se développera le recours au véhicule électrique, les batteries de ces véhicules pouvant être sollicitées comme moyen de stockage à certaines heures et de déstockage à d'autres heures. Ces batteries auront une « seconde vie » comme moyen de stockage stationnaire pour les petites installations solaires. Le « power-to-gas » consiste à utiliser l'électricité renouvelable excédentaire à certaines heures pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, cet hydrogène pouvant ensuite être associé à du CO₂ pour produire du méthane. Cet hydrogène et ce méthane peuvent être injectés dans les réseaux de gaz ou utilisés comme combustibles pour la mobilité (GNV, gaz naturel véhicule, et piles à combustibles pour l'hydrogène). Ils peuvent aussi être transformés à nouveau en électricité (on parle de méthanation) mais les rendements de la filière ne permettent pas aujourd'hui de rendre cette option rentable.

L'hydraulique demeure donc le moyen privilégié de stockage à une relative grande échelle de l'électricité et cela lui confère une valeur élevée lorsqu'aux heures de pointe le déstockage permet d'éviter la défaillance du réseau. L'eau stockée a un prix qui est alors calé sur le « coût défaillance » du réseau c'est-à-dire le coût que supporterait la collectivité si le réseau ne pouvait pas faire face à la demande. On parle d'un chiffre supérieur à 9000 euros par MWh pour ce « coût évité », ce qui est bien évidemment très supérieur au prix du marché de gros en période

normale (de l'ordre de 40 à 60 euros par MWh). L'hydraulique au fil de l'eau, dont le coût marginal (coût variable) est très faible voire nul bénéficie également d'une « rente infra-marginale » aux heures pleines et même aux heures les moins chargées de l'année, sur un marché où le prix est calé sur le coût marginal de l'équipement marginal (une centrale nucléaire ou une centrale thermique classique selon les cas), et cette rente permet de financer les coûts fixes de l'installation. Notons que, sur le marché de gros de l'électricité, la différence entre le prix aux heures de pointe et le prix aux heures creuses n'est pas aujourd'hui suffisant pour rentabiliser la construction de nouvelles STEP du fait d'un aplatissement de la courbe de « merit order » mais elle suffit pour rentabiliser les STEP déjà partiellement ou totalement amorties.

La logique du « merit order » implique que, sur le marché de gros de l'électricité (24 prix horaires par jour) les centrales sont appelées en fonction de leur coût variable croissant (on parle de coût marginal), ce qui confère un avantage relatif aux centrales renouvelables, dont les coûts variables sont faibles ; mais encore faut-il que ces centrales soient appelées sur le réseau lorsque le prix d'équilibre, calé sur le coût variable élevé d'une centrale thermique, est suffisamment rémunérateur pour couvrir les coûts fixes. Ce n'est pas le cas du solaire et pas toujours celui de l'éolien (la pointe se situant le soir, surtout en hiver) mais c'est heureusement le cas de l'hydraulique, ce qui explique son intérêt pour équilibrer le réseau.

Avec le développement à grande échelle des énergies renouvelables, le stockage de l'électricité va devenir une préoccupation croissante et les progrès techniques attendus au niveau de batteries de plus en plus performantes vont faciliter la flexibilité dont le réseau a besoin. Mais en attendant l'hydraulique demeure un atout décisif pour les pays qui, comme la France, ont la chance d'avoir un potentiel non négligeable de barrages. ■



FAIRE MIEUX RAYONNER L'ÉCOSYSTÈME ALPIN

En plein débat sur la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie et la détermination de la feuille de route de l'État pour les 15 prochaines années, un nouveau bouquet énergétique va se mettre en place.

Comment l'hydroélectricité, source d'énergie renouvelable aux atouts majeurs incontestables, à savoir ses capacités de stockage et sa grande flexibilité va jouer un nouveau rôle ?

Comment le cluster de l'arc alpin qui regroupe les principaux acteurs de la filière industrielle française de l'hydroélectricité peut-il jouer un rôle déterminant dans la mise en œuvre de la transition énergétique ? Quels sont les atouts aujourd'hui de ce cluster ?

Quelles sont les adaptations nécessaires pour faire rayonner demain cette filière hydroélectrique au niveau européen et finalement quelle est la feuille de route de Hydro 21 pour les années à venir ?



Roland VIDIL
Président Hydro 21 et Membre de Gire*

*(Groupement Indépendant et Rationnel sur l'Énergie)

Aujourd'hui, le cluster de l'arc alpin sur l'hydroélectricité présente de très nombreux atouts largement décrits dans la première partie introductive de ce livre blanc.

UNE HISTOIRE RICHE

Grenoble et la région Auvergne-Rhône-Alpes sont historiquement le berceau de la houille blanche et regroupent une part prépondérante de la filière hydroélectrique française et européenne. Pionnier de l'hydroélectricité, le papetier Aristide Bergès a été aussi à la source du développement industriel de nos vallées. Cent ans après, à l'ère de la transition énergétique, la houille blanche n'a rien perdu de son intérêt. Elle connaît même une croissance partout dans le monde, avec des turbines toujours plus efficaces et plus respectueuses de l'environnement, des aménagements moins coûteux et plus écologiques, des rénovations d'installations anciennes et des adjonctions de capacités de production électrique sur des chutes d'eau conçues à d'autres usages.

UNE SEGMENTATION DIVERSIFIÉE DES ACTEURS DU TERRITOIRE

Les acteurs de l'hydroélectricité de notre territoire sont réunis autour de quatre grands secteurs d'activités : l'ingénierie et la recherche industrielle avec des leaders mondiaux dans leurs domaines, la formation et la recherche académique, les activités de services et de sous-traitance pour la construction de matériels hydrauliques, mécaniques et électriques avec une

multitude d'acteurs pour l'essentiel des PME très actives. Enfin, puisqu'une des singularités de notre territoire est qu'il se situe au cœur du massif alpin, on retrouve tous les acteurs nationaux de la production d'énergie, de son exploitation et sa maintenance.

LA PREMIÈRE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

L'hydroélectricité constitue l'énergie renouvelable la plus importante de notre mix électrique actuel et possède de nombreux atouts pour faciliter l'intégration au réseau des autres énergies intermittentes. C'est aujourd'hui le seul moyen de stocker à grande échelle les excédents de production. Pourtant, il existe un déficit important de promotion par les médias et les pouvoirs publics et il est important que la Région AURA maintienne et renforce ses compétences pour garder la place de leader européen d'une filière industrielle qui représente près de 30 000 emplois en 2020 et une activité à l'export très majoritaire pour certains gros acteurs de la filière.

UN CONSENSUS DE TOUS LES ACTEURS POUR LE « TRAVAILLER ENSEMBLE »

Toutes ces compétences se regroupent dans l'Association Hydro 21 qui s'efforce de favoriser les synergies entre tous ces acteurs. Ces synergies locales ne naissent pas spontanément et doivent être construites à partir de volontés de coopération entre les acteurs qui ont à surmonter bien des obstacles, à



commencer par ceux qu'engendrent la concurrence entre les entreprises, les rivalités de métiers et de cultures. On va donc rechercher dans Hydro 21 à valoriser une stratégie du territoire à partir de ce qui est profitable à tous les acteurs dès lors que chacun comprend ce qu'il a intérêt à mettre en commun.

DES ATOUTS POUR LE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE DES TERRITOIRES ET DU TOURISME

Parmi les multiples avantages de l'hydroélectricité qui ne sont pas suffisamment connus des opinions publiques : son électricité est le plus souvent moins coûteuse que celle de toutes les autres filières. Ses aménagements servent fréquemment à la régulation des cours d'eau au profit de l'irrigation, de la navigation ou de la récréation. Ses capacités de stockage, avec ou sans pompage, sont extrêmement précieuses pour compenser l'irrégularité et l'intermittence de certaines autres sources renouvelables.

DEMAIN, DES ADAPTATIONS SONT NÉCESSAIRES POUR MIEUX FAIRE RAYONNER LA FILIÈRE

Ces adaptations sont portées par une croissance des marchés. En effet, l'hydroélectricité, qui apporte déjà une part prépondérante de l'électricité d'origine renouvelable, va se développer fortement dans les prochaines décennies. Il est donc plus que jamais nécessaire de soutenir cette filière que son ancienneté conduit trop souvent à négliger, alors que c'est elle qui contribuera de façon majeure à décarboner les systèmes de génération électrique des prochaines décennies.

UNE MEILLEURE RECONNAISSANCE

Une meilleure reconnaissance des atouts de cette filière (par rapport à l'éolien et le solaire) par les pouvoirs publics est nécessaire. En effet devant le sentiment d'impuissance lié à la désindustrialisation

de la France, au lieu de rechercher coûte que coûte des champions nationaux dans les filières énergétiques sur le solaire ou l'éolien déjà bien occupées par d'autres nations (Chine, Europe du Nord, ...), il serait plus efficace de soutenir la filière hydroélectrique française. Cette filière de tout premier plan porte une forte activité économique et des emplois qualifiés.

UN RENOUVELLEMENT DES COMPÉTENCES À PRÉVOIR

Mais un renouvellement des compétences des acteurs de la filière hydroélectrique est à prévoir pour intégrer les nouvelles technologies du digital, de l'intelligence artificielle, ... Aujourd'hui, les 5 à 10 000 personnes engagées sur le terrain de l'hydraulique et l'hydroélectricité, présentes entre Grenoble, Chambéry et Lyon, représentent un capital de compétences d'une exceptionnelle richesse qui n'a pas d'équivalent quand on le compare aux autres grands noms de l'hydroélectricité en Suisse, Italie ou Autriche. Cette concentration, qui garde une attractivité internationale incontestable, pourrait contribuer à mieux valoriser le savoir-faire français sur la scène internationale et accroître le recours aux fournisseurs français. Enfin, l'offre française pourrait saisir les opportunités existantes sur de nouveaux segments de marché (petites turbines, hydroliennes, ...) et d'autres activités en émergence.

UNE NOUVELLE FEUILLE DE ROUTE

Ces divers enjeux nous amènent à définir une nouvelle feuille de route de Hydro 21 :

- Pour améliorer la structuration du réseau des acteurs de l'hydro avec plus de transversalités, plus d'international et d'innovation
- pour mettre en avant les atouts de l'hydro qui est pilotable, flexible et stockable
- pour favoriser la compétitivité des entreprises de l'hydro et créer des liens B to B et des rendez-vous d'affaires en particulier. ■

LA RUBRIQUE HYDROÉLECTRICITÉ DE L'ENCYCLOPÉDIE DE L'ÉNERGIE

L'encyclopédie de l'énergie (www.encyclopedie-energie.org) réunit des connaissances expertisées, structurées et personnalisées sous la forme d'articles, de biographies des auteurs, de compléments bibliographiques et de présentations des centres de compétence sur divers sujets traitant de l'énergie. Conçue dans le cadre de l'École Nationale Supérieure de l'Énergie, de l'Eau et de l'Environnement (ENSE3), cette encyclopédie est développée avec l'appui du Pôle éditorial de l'Université Grenoble Alpes (UGA), en partenariat avec plusieurs entreprises du secteur de l'énergie.

Les articles sont classés sous douze rubriques : bases théoriques, usages de l'énergie, sources fossiles, hydraulique, autres sources renouvelables, nucléaire, électricité, nouvelles technologies (hydrogène, batteries...), environnement, économie et politique de l'énergie, histoire mondiale de l'énergie, statistiques.

Chaque article est précédé de l'une des quatre mentions (lecture facile, peu difficile, assez difficile, difficile) qui facilite les choix d'un large spectre de lecteurs incluant lycéens et étudiants de diverses disciplines, enseignants des écoles, collèges et lycées, autres adultes soucieux de suivre l'évolution scientifique, technologique, économique et historique de l'approvisionnement énergétique mondial.



Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX
Économiste et Président d'Honneur
de Hydro 21

La rubrique consacrée à l'hydraulique comporte à ce jour les **19 articles suivants** :

■ **Hydroélectricité : les conduites forcées de l'entreprise Bouchayer-Viallet à Grenoble**

PAR HENRI ET JEAN LE CHATELIER

<https://www.encyclopedie-energie.org/conduites-forcees-les-innovations-de-lentreprise-bouchayer-viallet-a-grenoble/>

■ **La petite hydroélectricité en France**

PAR AURÉLIE DOUSSET

<https://www.encyclopedie-energie.org/la-petite-hydroelectricite-en-france/>

■ **L'hydraulique villageoise dans les pays en voie de développement**

PAR DANIEL MILAN

<https://www.encyclopedie-energie.org/lhydraulique-villageoise-dans-les-pays-en-developpement/>

■ **Les hydrolennes**

PAR THIERRY MAITRE

<https://www.encyclopedie-energie.org/les-hydrolennes/>

■ **Les hydrolennes fluviales**

PAR MARIE-LAURE PAUTRET

<https://www.encyclopedie-energie.org/les-hydrolennes-fluviales/>

■ **Les ouvrages hydrauliques**

PAR THIBAUT ULRICH

<https://www.encyclopedie-energie.org/les-ouvrages-hydrauliques/>

■ **Les stations de pompage-STEP**

PAR JEAN-FRANÇOIS TOURNERY

<https://www.encyclopedie-energie.org/les-stations-de-pompage-step/>

■ **Hydro turbines rehabilitation**

BY BERNARD MICHEL AND OTHERS

<https://www.encyclopedie-energie.org/hydro-turbines-rehabilitation/>

■ **Hydropower : a vital asset in a power system with increased need for flexibility and firm capacity**

BY GHISLAIN WEISROCK

<https://www.encyclopedie-energie.org/hydropower-a-vital-asset-in-a-power-system-with-increased-need-for-flexibility-and-firm-capacity/>

■ **La réhabilitation des centrales hydroélectriques : une vraie opportunité**

PAR MICHEL SABOURIN ET AUTRES

<https://www.encyclopedie-energie.org/la-rehabilitation-des-centrales-hydroelectriques-une-vraie-opportunite/>

■ **La cavitation : une introduction**

PAR RENÉ PERRET

https://www.encyclopedie-energie.org/recherche/?mot-cle=Perret&ofpost_types%5B%5D=post

■ **Les pico-turbines hydrauliques, application aux réseaux de distribution d'eau**

PAR HUGO LE BOULZEC ET GILLES LAMBINET

<https://www.encyclopedie-energie.org/les-pico-turbines-hydrauliques-application-aux-reseaux-de-distribution-deau-2/>

■ **L'impact des aménagements hydroélectriques en Beaufortain**

PAR CATHERINE IVANOFF

<https://www.encyclopedie-energie.org/les-pico-turbines-hydrauliques-application-aux-reseaux-de-distribution-deau-2/>

■ Hydroélectricité au fil de l'eau : du projet à l'exploitation

PAR CLAUDE REBATTET

<https://www.encyclopedie-energie.org/hydroelectricite-au-fil-de-leau-du-projet-a-l-exploitation/>

■ Les grands aménagements hydroélectriques : Génissiat I

PAR BERNARD BRUSA-PASQUÉ

<https://www.encyclopedie-energie.org/les-grands-amenagements-hydroelectriques-genissiat-i/>

■ Les grands aménagements hydroélectriques : Génissiat II

PAR BERNARD BRUSA-PASQUÉ

<https://www.encyclopedie-energie.org/les-grands-amenagements-hydroelectriques-genissiat-ii/>

■ Stockage hydraulique et production d'électricité

PAR CLAUDE REBATTET ET BERNARD BRUSA-PASQUÉ

<https://www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-et-production-delectricite/>

■ Stockage hydraulique : atouts et contraintes

PAR CLAUDE REBATTET ET BERNARD BRUSA-PASQUÉ

<https://www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-atouts-et-contraintes/>

■ Stockage hydraulique : capacité de pompage-turbinage

PAR CLAUDE REBATTET ET BERNARD BRUSA-PASQUÉ

<https://www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-capacites-de-pompage-turbinage/>

■ Les grands aménagements hydroélectriques : Donzère-Mondragon

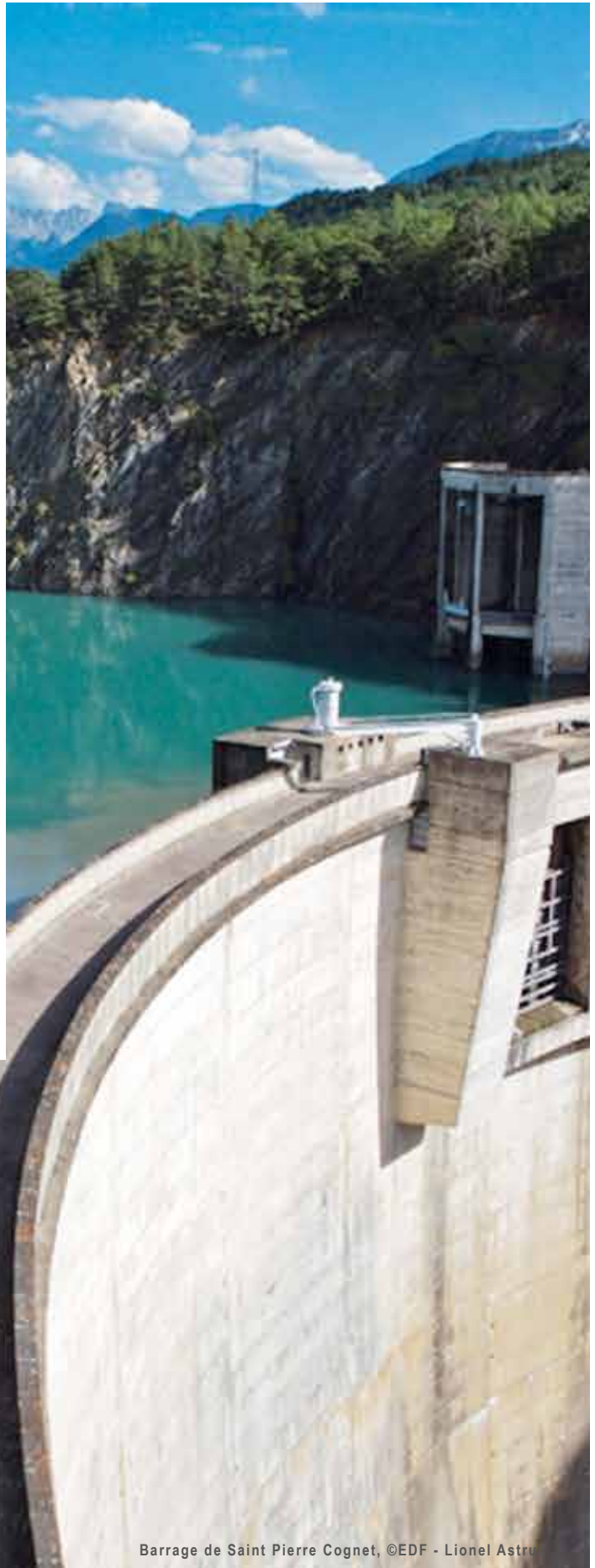
PAR BERNARD BRUSA-PASQUÉ

En préparation

■ Les grands aménagements hydroélectriques : Beauchastel

PAR BERNARD BRUSA-PASQUÉ

En préparation



Barrage de Saint Pierre Cagnet, ©EDF - Lionel Astruc

TENDANCES SUR LES MARCHÉS

ET FEUILLE DE ROUTE DES ACTEURS

Les Rencontres Business Hydro se veulent de véritables rencontres d'affaires des acteurs de la filière et une des finalités de ces rencontres est de favoriser les échanges entre tous les acteurs autour des marchés de l'hydroélectricité. Il est donc légitime que les tendances sur les marchés de demain trouvent une large place dans ce livre blanc.

Après le thème développé en 2017 sur l'Afrique,

terre de développement pour l'hydroélectricité et celui en 2018 sur la place de l'hydroélectricité dans le mix énergétique, le thème retenu pour Business Hydro 2019 est celui des marchés à l'export. Cela permet de passer en revue les divers segments de marché de l'hydroélectricité. Les témoignages qui suivent ne prétendent pas à l'exhaustivité mais donnent un éclairage



sur quelques tendances sur ces marchés et présentent une feuille de route des acteurs interviewés.

La petite hydro, la réhabilitation, le stockage, les marchés à l'export, la R&D, sont tour à tour passés en revue par un expert du domaine qui décline ensuite sa feuille de route.

Barrage de Serre Ponçon, ©EDF - Popy Xavier



LA PETITE HYDRO : MARCHÉS ACTUELS ET FUTURS

Interview par Marie-Hélène BOISSIEUX, *Dirigeante agence adeo communication*

La petite hydroélectricité est une source énergie renouvelable, propre, qui ne génère pas de gaz à effet de serre.

Parfaitement intégrée à son environnement, respectueuse de la biodiversité et des milieux naturels, la petite hydroélectricité s'inscrit en parfaite synergie avec les autres usagers des rivières. Il existe environ 2 000 petites centrales partout en France, dont la moitié environ en Auvergne Rhône-Alpes, et dont certaines existent depuis plusieurs dizaines voire centaines d'années. Installées au fil de l'eau, elles alimentent le réseau toute l'année et à tout moment.



Jean-Philippe REILLER
Président d'Alpes Hydro Association

Qui est Alpes Hydro Association ?

Alpes Hydro Association (www.alpes-hydro.com) a été créée le 7 janvier 2014 par quelques producteurs Alpains (principalement issus des départements 01, 05, 38, 73, 74) et a tenu sa première réunion publique le 8 mars 2014 dans un site symbolique : le musée de la Houille Blanche, ancienne maison d'Aristide Bergès, pionnier de la profession, à Villard Bonnot (38). Moins d'un an après, ce sont plus de 50 producteurs qui adhèrent, représentant une majorité des « petits » hydro électriciens de ces départements. Aujourd'hui, ce sont plus de 90 adhérents en Région Auvergne-Rhône-Alpes et PACA.

Dès le début 2014, sa principale activité a consisté à s'organiser et gérer par départements, se présenter auprès des pouvoirs publics et des Administrations, collectivités locales. Alpes Hydro Association a également assisté quelques producteurs dans des réunions ou des litiges, afin le plus souvent de permettre une médiation.

Comment positionnez-vous le marché actuel au niveau de la Petite Hydroélectricité ?

La petite hydroélectricité produit environ 7 milliards de kWh à l'année, soit plus de 10% de la production hydroélectrique totale du pays.

Nous avons 2 types de marché : la rénovation (ou

la réhabilitation) de centrales hydroélectriques et la création de nouvelles centrales. Depuis 2007, l'Etat a mis en place des mesures visant à inciter à la rénovation de centrales hydroélectriques. Grâce à cette politique, de nombreuses rénovations ont été faites.

Toutefois, le projet de Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) pour la période 2019 – 2028 définit un cadre moins favorable que l'ancienne PPE. Alors qu'il prévoyait dans l'ancienne version une augmentation sur la production de la petite hydroélectricité de 3 milliards de kWh en 2023, **celle-ci a été repoussée à 2028.**

Le risque est de réduire ainsi considérablement le potentiel de développement de centrales hydroélectriques en France, déjà fortement impacté par les classements de rivières, et d'inhiber l'émergence de nouveaux projets hydroélectriques et la rénovation de projets existants.

Par ailleurs, la PPE prévoit de prioriser les aménagements permettant d'accroître la flexibilité du parc mais sans en préciser les modalités. Seuls les sites au stade de l'enquête publique pourront désormais candidater : cela pose la question des coûts importants engagés par les porteurs de projets qui ne seraient pas retenus.

Quelles sont les consultations en cours et futures ?



Chantier de l'aménagement hydraulique de Romanche Gavet, ©EDF - Christophe Huret

Depuis 2016, l'Etat a souhaité mettre en place une nouvelle organisation au niveau des appels d'offres, contraignant les développeurs de projets à se soumettre à un appel d'offres qui permet de déterminer le prix de vente qui sera le principal critère pour être retenu ou non. Le calendrier des appels d'offres lancé en 2017 porte sur 105 MW, en 3 tranches de 35 MW. Nous avons assisté ainsi à un changement de tarifs et 9 des 14 projets retenus sont situés en Auvergne-Rhône-Alpes.

Quels acteurs mobilisez-vous et quelles difficultés rencontrez-vous ?

Aujourd'hui, quelques entreprises se mobilisent vers quelques marchés à l'export : essentiellement l'Afrique et l'Amérique du Sud.

Les plus grosses difficultés sont d'ordre environnementales, avec la continuité écologique et les classements de rivières, les SDAGE (Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux)... Il y a à ce niveau surtransposition des directives européennes. Aujourd'hui, beaucoup de fabricants de petites turbines électriques (ou turbiniers) ont disparu en France...

Heureusement, des start-up se lancent dans les nouvelles technologies et dans la fabrication de turbines innovantes et des alternateurs qui tournent à une allure modérée.



©Alpes Hydro Association

Quels sont les délais d'instruction pour réaliser une centrale ?

Les processus sont très longs... la durée de réalisation est de plusieurs années.

Entre le moment où l'on dispose du foncier, les études, le temps d'instruction puis l'attente de l'avis favorable des services de la Préfecture, le temps de raccordement au réseau de distribution et la réalisation,

il faut parfois compter pas loin de 10 ans.

On constate également un manque de soutien des établissements financiers : acheter une centrale hydroélectrique représente en général 10 fois son chiffre d'affaires annuel.

Les établissements financiers exigent des garanties très importantes en contrepartie, difficiles à négocier, surtout si les centrales sont en location. Si l'on compare à d'autres situations dans l'Industrie où les retours sur investissements sont de l'ordre de 3 à 4 ans, nous sommes à bien plus de 10 ans dans la petite hydroélectricité.

Quelle typologie de profils avez-vous dans les territoires ?

Le profil des hydroélectriciens est varié : du conseil à l'exploitant, nous avons aussi bien des développeurs, des consultants que des entreprises de taille de 1 à 1 000 personnes.

Tous les métiers sont représentés : juriste, maçon, électricien, mécanicien, concepteur, BE, ... **Nous sommes des passionnés, au sein d'un univers complexe, technique et en perpétuelle innovation.**

La petite hydroélectricité contribue au dynamisme économique et social du territoire, au cœur du mix énergétique français et fournit l'équivalent des besoins du pays en éclairage public extérieur.

Quelles sont vos préconisations ?

Nous souffrons d'un manque **de reconnaissance et de visibilité**, alors que l'énergie produite est une énergie verte de grande qualité.

Nous souhaiterions que la Petite Hydroélectricité dépende directement de la Direction Générale de l'énergie et du Climat, (DGE) (et non de la Direction de l'Eau et de la Biodiversité), car nous sommes une force à part entière dans le développement de nouvelles solutions énergétiques pour la France.

Nous nous inscrivons dans une démarche environnementale, dans le respect total de la biodiversité. ■



LES MARCHÉS ACTUELS ET FUTURS DE L'HYDRO EN FRANCE



Frédéric HOFMANN
Directeur développement EDF Hydro

Y-a-t-il un potentiel de développement de l'hydro en France ?

L'hydroélectricité est historiquement développée en France. Pour autant, elle y a encore un vrai potentiel de développement. Le SER a chiffré le développement possible pour 2030, qui conduirait à 27 200 MW de puissance installée (contre 25 500 MW aujourd'hui) pour une production de 95 TWh (contre 67 TWh actuellement). Il nous faut donc libérer ce potentiel, et vite, pour deux raisons : des milliers d'emplois supplémentaires sont concernés, dans des territoires souvent ruraux ou de montagne, et le maintien et le développement de l'hydro sont nécessaires à la transition énergétique. Il faut donc nous donner les signaux nécessaires.

Lesquels ?

D'abord, il faut agir pour rendre possible la réalisation de nouvelles installations, de petite ou de grande hydraulique. En ce sens, il faut bien sûr maintenir des appels d'offres pour la petite hydro. Mais aussi lancer des appels d'offres pour de nouveaux aménagements de grande hydraulique. Selon une étude menée en 2013 par le ministère, ce sont 1200 MW d'hydraulique neuve qui peuvent être développés, concessions et autorisations, dans le respect du classement des cours d'eau. Aucun appel d'offres n'a été lancé pour le développement de nouvelles concessions alors qu'une quarantaine de sites avaient été

identifiés par un travail commun entre l'Etat et les producteurs en 2015. Cette voie de développement est inscrite dans l'actuelle PPE et dans le projet de PPE, et nous comptons contribuer à sa réalisation.

Et la piste de l'investissement contre prolongation de concession ?

Ce serait en effet le moyen le plus rapide d'accélérer le développement de nouveaux moyens sur quelques concessions comme le permet la loi de transition énergétique. Je pense bien sûr à notre projet sur la vallée de la Truyère, qui permettrait la réalisation de plusieurs centaines de MW de stockage et de flexibilité, et dont chacun s'accorde à reconnaître que c'est un magnifique projet industriel et énergétique. Mais il est encore aujourd'hui bloqué par les discussions avec la Commission européenne.

Concernant le stockage justement, d'autres développements sont-ils possibles ?

Oui, et pour cela il faut également lancer des appels d'offres. L'hydro est aujourd'hui la seule technologie de stockage de masse de l'électricité, grâce aux Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP). En France, elles permettent de stocker l'électricité lorsqu'elle est trop abondante et de la restituer ultérieurement avec une puissance de 5000 MW sur le réseau. Il y a des possibilités de développement d'installations de ce type, dont la technologie a depuis longtemps fait la preuve de son intérêt et de son efficacité.

Et concernant la réhabilitation des installations existantes, y-a-t-il là des marges de manœuvre ?

Incontestablement. Déjà, chaque année, EDF Hydro consacre entre 400 et 450 millions d'euros à la maintenance et à la modernisation de son parc. Les installations hydroélectriques ont une très longue durée de vie, et nécessitent régulièrement des travaux de rénovation. Ces travaux peuvent se doubler d'investissements de modernisation pour s'adapter aux nouveaux besoins du système électrique, particulièrement de flexibilité avec la part croissante d'énergie renouvelable variable dans le mix. Ces investisse-



Barrage de Rochebut, ©EDF - Dhumes Patrice

ments concernent le génie civil, les conduites forcées, les turbines, les générateurs... Ce sont de très gros investissements, et de très gros chantiers. Il y a clairement un marché de la rénovation, en particulier concernant les installations de moyenne puissance, jusqu'à une trentaine de MW.

Quel est l'enjeu ?

Toutes les centrales de ce segment ne peuvent pas couvrir par la vente de l'énergie aux prix de marché, leurs coûts en hausse (augmentation des exigences environnementales et de la fiscalité locale...). Cela rend donc impossible tout investissement de rénovation.

Un dispositif de soutien étendu aux installations jusqu'à 30 MW permettrait de relancer l'investissement et de démarrer d'importants chantiers sur tout le territoire. Cela profiterait également à de nombreuses entreprises, en particulier aux PME locales, et leur assurerait un plan de charge et une visibilité à même de conforter et développer leurs savoir-faire et bien sûr l'emploi. On parle ici de près de 3000 MW d'hydraulique pour une production d'environ 9 TWh/an.

Vous appelez à étendre le dispositif prévu par le projet de PPE ?

Oui. Le projet de PPE prévoit un soutien à la rénovation pour les installations de moins de 4,5 MW, grâce à un dispositif de complément de rémunération. Ce serait un progrès, mais une telle limitation est regrettable car c'est en réalité le segment jusqu'à 30 MW qui est particulièrement concerné.

Et concernant les centrales de plus forte puissance ?

Là aussi, le potentiel de développement est réel. Il est

possible d'augmenter la puissance et/ou l'énergie de certains aménagements, sans changer le barrage. Par exemple en construisant un nouveau groupe comme nous le faisons à La Coche en Savoie (+240 MW) et même parfois en changeant seulement les roues comme nous le faisons avec le chantier de surpuissance à La Bathie, en Savoie également. Sur certaines concessions, nous pouvons le faire sans aucun soutien public, ni prolongation de concession. Il faut simplement nous y autoriser.

C'était le principe de la loi POPE ?

En effet, la loi Pope permettait des augmentations de puissance (jusqu'à 20%) sur les concessions en cours, par simple déclaration. Mais cette disposition a été supprimée lors de la transposition de la directive concession en 2016, dans une vision extensive de cette directive qui revient à considérer qu'un développement de cette nature serait une modification substantielle, et donc interdite. Alors même qu'il ne s'agit que de tirer le meilleur de la concession, ce qui est l'intérêt de l'Etat concédant comme du concessionnaire. Un projet comme La Coche ne verrait pas le jour aujourd'hui dans ces conditions.

En conclusion êtes-vous globalement confiant dans l'avenir de l'hydroélectricité ?

Oui bien sûr ! L'hydro est une énergie renouvelable indispensable au développement des autres énergies vertes et donc à la transition énergétique. Et il y a un réel potentiel de développement, un savoir-faire reconnu dans ce domaine, une volonté forte de la filière. ■



Barrage de Grandmaison ©EDF - Oddoux Franck

LES MARCHÉS DES ÉQUIPEMENTS HYDRO À L'EXPORT

Interview par Marie-Hélène BOISSIEUX, *Dirigeante agence adeo communication*



David HAVARD

Chef de Produits

Division Hydro de GE Renewable Energy
Siège mondial de la Recherche & Développement,
Grenoble

Comment positionnez-vous l'hydroélectricité au sein de GENERAL ELECTRIC (GE) ?

GE Renewable Energy est un leader mondial de l'équipement hydroélectrique dans les grandes, moyennes et petites centrales hydroélectriques, ainsi que pour la réhabilitation des installations existantes. La Société a équipé un quart de la capacité installée d'hydroélectricité dans le monde et notre activité grenobloise est très fortement orientée à l'export.

GRENOBLE est le siège mondial de l'Ingénierie et Recherche & Développement, de la stratégie produit et des achats pour la division Hydro. Le site héberge le plus grand laboratoire au monde d'essais de turbines par modèles réduits.

Le site est en activité depuis plus de 100 ans, et l'aventure hydraulique continue aujourd'hui avec GE Renewable Energy. Le marché des EnR en général, et de l'hydro en particulier est considérable, avec une activité marquée dans les pays émergents, qui expriment un vrai besoin d'accès à l'électricité et à l'indépendance énergétique.

Présentez-nous le pôle GE RENEWABLE ENERGY.

C'est un pôle au sein de GE, créé lors du rachat de la branche énergie d'ALSTOM en 2015, dont le siège est en région parisienne. GE affiche une forte volonté de faire monter en puissance ce Pôle des énergies renouvelables. C'est un axe de croissance majeur, un secteur dont les tendances de marché sont porteuses et à travers lequel GE construit un modèle industriel de la transition énergétique.

Ce Pôle des énergies renouvelables regroupe cinq activités : l'éolien terrestre, l'éolien en mer, les pales d'éoliennes, l'hydroélectricité et tout récemment l'addition de l'activité réseau électrique de GE Grid Solutions. S'y ajoutent les services digitaux, les technologies hybrides renouvelables, les batteries de stockage ainsi que quelques composants électroniques dédiés à l'énergie solaire.

On dit couramment « là où il y a de l'eau, il y a de l'hydro », est-ce exact ? Quelle tendance se dessine ?

Plus tout à fait... Nous commençons à voir des centrales de stockage d'énergie, appelées STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage), notamment dans des zones désertiques. Pour les centrales neuves conventionnelles (de production), ce sont les pays comme la Chine, l'Inde, l'Asie du Sud-Ouest, l'Amérique du Sud et l'Afrique qui offrent le plus d'opportunités.

On peut distinguer aujourd'hui quatre segments de marché. Le marché de la réhabilitation et le service des machines dont la durée de vie est de l'ordre d'une cinquantaine d'années : à la fin de cette période, une partie de l'équipement doit être remplacée. Ce marché tourné vers l'Europe occidentale, l'Amérique du Nord et dernièrement l'Amérique du Sud, est plutôt en croissance. Le renouvellement d'équipements s'accompagne souvent d'une augmentation de puissance ou de production annuelle des sites existants.



Un deuxième segment correspond aux nouveaux équipements en Asie et en Afrique, qui est plutôt stable. En attestent plusieurs grands chantiers. Par exemple, le projet Grand Renaissance en Ethiopie pour lequel GE Renewable Energy a livré les premières turbines d'une puissance unitaire de 375 MW.

Une autre activité porte sur le stockage et les STEP. En effet, l'hydroélectricité a un rôle à jouer dans l'équation mondiale de la transition énergétique, avec le stockage. Pour doubler la part des énergies renouvelables en 2030 et maintenir les réseaux électriques opérationnels, nous avons besoin de stocker l'électricité, sous une forme ou une autre.

Par exemple, prenons le cas de l'Israël, véritable « île électrique », sans connexion avec ses voisins, possédant une base installée de génération de 18 000 MW, dont 7 MW seulement d'hydroélectricité. Le gouvernement israélien a décidé de bâtir 800 MW de STEP, afin de mieux gérer l'ajout d'autres énergies renouvelables, telle que l'énergie solaire. Ces STEP doivent être extrêmement flexibles et rapides : nous sommes en train de terminer la mise en service d'un premier groupe, qui montera de zéro à 100% de puissance en un temps record. Ce marché israélien s'accompagne de contrats de maintenance et d'exploitation pendant 18 ans.

Un quatrième segment de marché porte sur la petite hydroélectricité supérieure à 5 MW unitaire, sur lequel GE Renewable Energy se positionne pour de basses et moyennes chutes.

Quel avenir voyez-vous pour l'hydroélectricité ?

La montée en puissance des énergies renouvelables est en train de changer la donne...

Le BCG (Boston Consulting Group) déclare : « Nous considérons que le stockage de l'électricité est un élément clef essentiel pour permettre de déployer la capacité d'énergie renouvelable dans le monde entier ».

La technologie de stockage de l'hydroélectricité est un puissant levier de la transition énergétique du 21^e siècle. Elle fournit de la production, du stockage et la stabilisation des réseaux électriques, et en outre, non des moindres, peut participer à la gestion de l'eau.

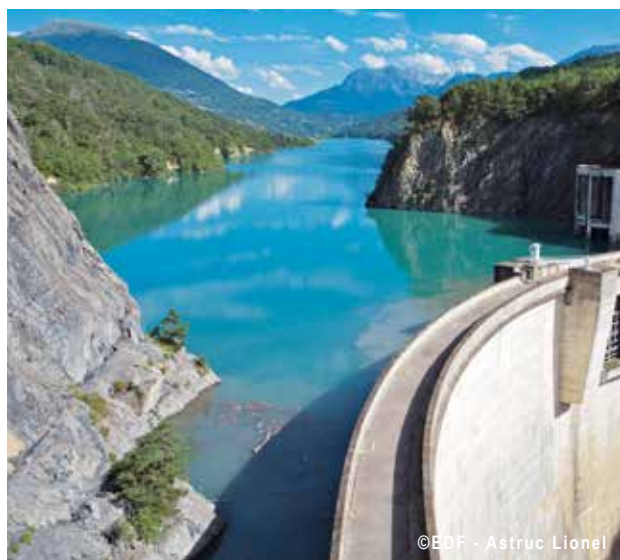
Comment organisez-vous la R&D à Grenoble ?

Nous nous appuyons sur nos équipes internes, ainsi que sur la R&D du centre universitaire grenoblois et les travaux de la chaire universitaire Hydro'like, mise en place avec ENSE³ de Grenoble INP, pour mettre au point des équipements innovants, capables de relever les défis de la réhabilitation et de l'optimisation de la performance.

Il est également important d'écouter les clients : les projets collaboratifs tels que « Penelop » et « Innov'hydro » sont très intéressants pour travailler avec tout l'écosystème industriel, y compris les exploitants de centrales. GE Renewable Energy investit aussi dans le digital : les moyens mis à notre disposition par le groupe vont nous permettre de réaliser cette transition numérique, pour mieux suivre et prédire le comportement des machines dans un système électrique qui évolue.

Le Groupe s'appuie ainsi sur les partenariats avec les acteurs académiques, PME et start-ups grenobloises.

Enfin, l'Environnement est au cœur des préoccupations de GE. Nous développons par exemple des turbines ichtyophiles¹ et des roues qui ajoutent de l'oxygène dissous à l'eau turbinée, afin d'améliorer la vie aquatique en aval. ■



1. Compatibles avec la vie des poissons.

LES ENR ENTRE HYDROÉLECTRICITÉ ET HYBRIDATION

Interview par Marie-Hélène BOISSIEUX, *Dirigeante agence adeo communication*

CNR, avec un chiffre d'affaires de 1,3 Md d'euros, 1 400 personnes, est le premier producteur français d'énergie exclusivement renouvelable et le concessionnaire du Rhône pour la production d'hydroélectricité, le transport fluvial et l'irrigation. Cette concession se distingue des concessions hydroélectriques classiques par ses objectifs multiples et solidaires. CNR y a développé un modèle redistributif, dans lequel la production d'électricité verte se conjugue avec l'aménagement des territoires.

Avec 80 ans d'expérience sur le Rhône, CNR est une entreprise intégrée qui réunit tous les maillons de la chaîne de valeur de l'énergie : conception, construction, exploitation et maintenance d'ouvrages, commercialisation d'énergie exclusivement renouvelable. CNR propose ses services en gestion et valorisation des énergies renouvelables intermittentes à d'autres producteurs et exporte son expertise en ingénierie hydroélectrique, fluviale et environnementale dans le monde entier.



Frédéric STORCK

Directeur Transition Énergétique
et Innovation de CNR

Quelles sont les missions de CNR en termes d'hydroélectricité ?

Depuis 2015, nous travaillons avec l'Etat et l'Union Européenne à la prolongation de cette concession à buts multiples qui devait prendre fin en 2023 et devrait être prolongée jusqu'en 2041, soit de 18 années supplémentaires.

Notre objectif vise à compléter l'aménagement hydroélectrique du Rhône qui comporte aujourd'hui 3 000 MW, avec 5 petites centrales hydroélectriques supplémentaires et une usine de 37 MW, et à améliorer son productible.

Redevenue un producteur indépendant d'électricité en 2001 à l'ouverture du marché, CNR s'est diversifiée dans l'éolien et le solaire à partir de 2006 et atteindra une capacité de 1 000 MW dans ces énergies en 2020.

Pour 2030, l'objectif est de parvenir à une parité de capacité de production entre hydroélectricité, éolien et solaire.

Le cas du Rhône est particulier dans le paysage hydroélectrique, car c'est un fleuve dont la production au fil de l'eau est très variable en fonction des aléas climatiques, et en tant qu'opérateur, vous n'avez pas de moyen de stockage, n'est-ce pas ?

Effectivement, cette contrainte nous a amenés à réfléchir en profondeur sur les optimisations à dévelop-

per pour tirer le meilleur parti en matière de production d'énergie et de flexibilité. Nous avons ainsi dû développer une expertise unique ainsi que des méthodes et des outils ad hoc, pour exploiter au mieux les 19 centrales du Rhône.

Le cahier des charges de nos usines autorisait dès le début l'utilisation des « marnages », c'est-à-dire des variations de cote des plans d'eau des retenues, nous permettant ainsi de réaliser du stockage au pas journalier.

Cette technique, qui a été optimisée au fil des années, présente l'intérêt de pouvoir déplacer l'énergie pour la synchroniser avec la demande en électricité, selon les heures des pointes d'hiver ou d'été, tout en générant un chiffre d'affaires complémentaire.

Grâce à des systèmes de prévision et de téléconduite très fins et centralisés à Lyon, nous sommes capables d'optimiser la valorisation de la production du Rhône, tout en respectant l'ensemble des contraintes liées à la navigation, à l'irrigation, à la présence de pêcheurs, mais aussi à l'exploitation des centrales nucléaires.

Nous voyons apparaître le développement de nouveaux usages de l'électricité (voitures électriques...). Comment comptez-vous valoriser les opportunités qui y sont liées, notamment en termes de flexibilité de consommation ?

Aujourd'hui, CNR valorise sa production essentiellement sur le marché de gros de l'électricité, mais le développement des smart-grids, de l'internet des objets par exemple, ouvre la voie à l'intégration dans le système électrique du pilotage de la consommation, comme un moyen de stockage et de lissage permettant d'atténuer les effets de l'intermittence des énergies renouvelables.

Pour gérer ces systèmes complexes et diffus, nous développons une « centrale virtuelle », qui permet d'agréger les différents moyens de production hydraulique, éolien et solaire, ainsi que différents consommateurs disposant de flexibilité, comme la mobilité électrique par exemple. Cette centrale virtuelle, qui réunit en une seule entité un très grand nombre d'éléments sur lesquels on peut agir (batteries) ou non (production éolienne) porte la responsabilité de CNR vis-à-vis de RTE et vis-à-vis du marché de l'électricité. Elle est basée sur des outils informatiques de pointe faisant notamment appel à l'intelligence artificielle et au big data, afin de trouver à tout moment un fonctionnement optimal intégrant l'ensemble des opportunités et des contraintes.

Dans cette logique, nous avons investi en 2018 dans la start-up lyonnaise, Bee-Bryte, afin de développer des offres de fourniture d'électricité verte locale intégrant la mise en valeur de la flexibilité de clients finaux, industriels ou tertiaires.

Notre enjeu est le suivant : nous souhaitons démontrer qu'un mix énergétique exclusivement renouvelable et météorologique (hydraulique, éolien, solaire) est efficace d'un point de vue économique et du point de vue des usages, ce qui nécessite d'investir dans des moyens de stockage et de pilotage de la flexibilité, seuls ou au travers de partenaires.

Le développement durable est le socle historique de CNR, selon lequel l'ensemble des activités créatrices de valeur doivent favoriser un développement socialement équitable, économiquement viable et respectueux de l'environnement... Comment cette identité se traduit-elle aujourd'hui ?

Nous nous intéressons par exemple au développement énergétique et écologique des îles, et notamment à la mise en œuvre de parcs de production d'électricité solaire et éolienne, liée à des moyens de stockage et pilotés par des micro-grid, qui permettraient d'atteindre rapidement les objectifs de la Loi de Transition Énergétique.

C'est de plus un moyen pour nous de tester ces « centrales virtuelles » locales, avant de les déployer

en zone interconnectée. Nous développons actuellement un projet d'envergure à Marie Galante, où plusieurs dizaines de mégawatts de capacité de production et de stockage sont à l'étude. L'objectif est de remplacer l'électricité très carbonée de ces îles par des énergies propres.

En 2004, CNR a ajouté à son cahier des charges un schéma directeur de missions d'intérêt général. Une partie des revenus tirés de l'exploitation du Rhône doit ainsi directement bénéficier aux territoires. Ce sont plus de 150 millions d'euros tous les 5 ans qui sont dédiés à ces missions. Pouvez-vous nous citer des exemples de réalisations passées et à venir ?

Plus de 500 projets ont déjà été menés à bien pour l'environnement, le transport fluvial, le tourisme, les énergies renouvelables. Dans les années à venir, nous allons nous focaliser en particulier sur l'agriculture durable, en relais de notre rôle historique sur l'irrigation. L'objectif est de contribuer à assurer sa pérennisation et son développement, en lui permettant de mieux consommer l'eau et de lutter contre les effets du réchauffement climatique.

Nous travaillons par exemple sur la manière vertueuse de développer à moyen terme l'agrovoltaïsme, c'est-à-dire de combiner une irrigation de précision, avec la protection par ombrage des cultures contre des épisodes de sécheresse et de canicule, contre des précipitations extrêmes et contre les ravageurs, tout en générant un revenu grâce à des panneaux solaires. La combinaison des systèmes agronomiques et énergétiques pourrait permettre d'atteindre une optimisation globale des parcelles agricoles, mais il est nécessaire de l'étudier de manière très précise et transparente, pour que le monde agricole s'en empare.

Et pour conclure ?

Nous sommes en plein changement de paradigme, passant d'une gestion de grosses centrales hydroélectriques face au marché de l'électricité, à la gestion d'un parc de production-consommation qui intégrera un grand nombre de petites centrales et de petits parcs renouvelables appartenant à CNR et à des tiers ainsi que des moyens de stockage et des clients flexibles. Ceci nous permettra de démontrer que l'intermittence du renouvelable n'est plus un problème. Nos investissements dans la filière hydrogène depuis quelques années participent de cette ambition. À suivre... ■

FORMER LES INGÉNIEURS POUR LES TRANSITIONS DE DEMAIN

Interview par Marie-Hélène BOISSIEUX, *Dirigeante agence adeo communication*



Yves MARÉCHAL
Directeur de Grenoble INP-ENSE³

Présentez-nous INP-ENSE³ ? Quelle est la vocation de cette école d'ingénieurs née à GRENOBLE ?

Le monde d'aujourd'hui prend désormais en compte la gestion de nos ressources de demain. Être diplômé de l'école ENSE³, c'est faire face aux enjeux de la **transition énergétique**, à la problématique croissante des **ressources en eau**, à l'**aménagement** et au **développement durable**. L'Établissement Grenoble INP-ENSE³ est le fruit de la fusion des deux écoles ENSHMG (Mécanique et Hydraulique) et ENSIEG (Energie et Traitement de l'information).

Grenoble INP-ENSE³ forme des ingénieurs, des étudiants en master et des docteurs de haut-niveau, avec un socle de compétences solides, répondant à des enjeux sociétaux et économiques à forte **convergence industrielle**. Une large **palette de métiers** et de carrières s'ouvre à nos étudiants : de la conception aux services clients, en passant par la production et la gestion des ressources.

Nous accueillons plus de 1 200 étudiants, soit environ 400 diplômés par an dont 30% d'étrangers.

Vous êtes également Vice-Président de Tenerrdis, pôle de compétitivité dédié à la transition énergétique. Comment se positionne l'Etablissement ENSE³ au sein de l'écosystème Grenoblois ?

La recherche de Grenoble INP-ENSE³ se structure autour de laboratoires nationaux et internatio-

naux copilotés avec nos partenaires académiques et organismes de recherche (CNRS, INRIA, IRD, Irstea, CEA) au sein de la Communauté Université Grenoble-Alpes. Les collaborations fortes entre les équipes scientifiques et les moyens technologiques de pointe d'appui à la recherche (plateformes technologiques...) lui permettent d'atteindre un niveau d'excellence reconnu par la communauté internationale. Nous disposons d'atouts majeurs avec l'Institut Carnot « énergies du futur », qui représente près de 2 000 chercheurs à Grenoble, avec le Cremhyg qui est le centre de recherches et d'essais de machines hydrauliques de Grenoble, et avec enfin SuperGrid, toutes ces structures étant fortement connectées à Tenerrdis, pôle de compétitivité et acteur majeur de l'hydraulique.

Créé en 2012, Tenerrdis, pôle de compétitivité positionné dans les nouvelles technologies de l'énergie, rassemble des Entreprises réparties sur l'ensemble du territoire, avec un ancrage profond en auvergne Rhône-Alpes. Il apporte une capacité de partenariat, de mise en réseau avec la Recherche académique et une capacité de développement à l'étranger.

La mission du pôle Tenerrdis est de favoriser la croissance d'activité durable et la création d'emplois pérennes dans les filières des nouvelles technologies de l'énergie, en cohérence avec les enjeux de la transition énergétique, en mobilisant l'ensemble des ressources (industrielles, institutionnelles, académiques et scientifiques).

Tenerrdis, dédié à la transition énergétique a déjà labellisé plus de 250 projets menés souvent conjointement par des grands groupes, des PME et des laboratoires. Smart Grid Campus qui mobilise la recherche sur les réseaux électriques intelligents, a été labellisé Campus d'Excellence.

Dans cet ensemble composite, chacun a sa place dans le développement des innovations au service des PME.

Comment voyez-vous l'hydroélectricité du futur ? Quels sont vos axes d'innovation propres



Barrage de Serre Ponçon, ©EDF - Popy Xavier

à booster le développement des PME et Grands groupes ?

Dans le contexte du mix énergétique, le potentiel hydraulique doit être associé à d'autres énergies renouvelables. Notre vocation est de former nos ingénieurs à l'ensemble des technologies et d'amener autour des barrages de la simulation numérique, de l'intelligence artificielle, des drones, des réseaux d'énergie intelligents... Objectif ? Optimiser les rendements des machines, améliorer l'exploitation des centres de production, ...

La création de la chaire industrielle Hydrolike avec Alstom (aujourd'hui GE Hydro) démontre l'excellence de nos savoir-faire. Destinée à étudier les machines hydrauliques du futur en réalisant des simulations numériques avancées et des bancs de tests sur des machines physiques, elle a pour vocation d'une part de produire de la connaissance nouvelle et d'autre part, d'optimiser les installations existantes ou futures.

Avez-vous des exemples à citer démontrant le développement des start-ups et d'autres sources d'innovation ?

Oui, je pense aux hydroliennes, turbines hydrauliques qui utilisent l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique du vent. La particularité de cette innovation réside dans sa modularité, sa facilité de maintenance, son coût modeste d'installation et son intégration parfaite dans l'environnement. Installée récemment sur Lyon, c'est l'exemple même de l'innovation d'une start-up (HYDROQUEST) parfaitement réussie. D'autres start-up peuvent être citées, comme MOTRHYS, dont les créateurs sont issus de ENSE³. MOTRHYS propose ainsi la maintenance prédictive des barrages, avec le développement de solutions logicielles adaptées au monitoring des systèmes fonctionnant de façon intermittente.

La réputation d'excellence de votre Etablissement renforce votre attractivité à la fois auprès des Etudiants et des Entreprises, n'est-ce pas ?

Oui, Grenoble INP-ENSE³ constitue un vivier de jeunes talents pour les grands groupes et PME qui souhaitent renforcer leur stratégie de développement à l'export. Les étudiants de toute la planète sont attirés par la renommée de la formation et de l'ensemble de l'écosystème grenoblois inscrit dans l'innovation,

la recherche et l'excellence de nos formations.

Ense³ est une école fortement ancrée et reconnue à l'**international** par sa capacité à proposer plusieurs dispositifs de séjours à l'étranger pour nos étudiants et plus de 350 accords avec des universités partenaires à travers le monde ont été signés.

Le processus de recrutement d'étudiants se déroule au sein des universités à l'étranger pour le compte d'entreprises. L'objectif est de former ces jeunes sur nos technologies en Master. Ce recrutement se fait dans plus de 50 pays, et l'intérêt est double : la garantie d'une embauche dans l'entreprise pour l'étudiant et l'assurance des compétences cibles pour l'Entreprise.

Trois masters répondent à ces besoins : **Le Master « Hydraulic and Civil Engineering », le Master « Electrical Engineering for smart grids and buildings » et le Master « Fluid mechanics and energetics ».**

Ces formations s'appuient sur la proximité avec un environnement scientifique d'une grande richesse et **un exceptionnel potentiel industriel.**

Et pour conclure ?

Nous avons revu il y a quelques années la structuration de l'Établissement Grenoble INP en l'orientant vers une vision globale des technologies et du sens des nouveaux enjeux sociétaux. Ainsi aujourd'hui, nous définissons l'ingénieur ENSE³ comme « ingénieur des transitions ».

Nous réfléchissons par ailleurs sur les axes « seconde vie » et de « low-tech », qui apportent un regard différent par rapport à la notion de croissance et nous nous attachons par exemple à construire des turbines hydrauliques de type Banki à partir de matériaux de récupération. Le monde change profondément, notamment au regard des nouvelles données du changement climatique. Nos ingénieurs sont les acteurs de ce changement. Une preuve ? L'école est membre observateur de la COP (Conférence of Parties, le lieu des négociations internationales sur cet enjeu) et ses étudiants participent aux échanges qui ont lieu chaque année. À leur retour, ils reviennent avec une richesse extraordinaire et ne cessent de communiquer sur les réseaux leur profond engouement. Une belle réussite de ce changement de paradigme ! ■

PARTIE 4

7 PROPOSITIONS

LES 7 PROPOSITIONS D'HYDRO 21

- 1 | **Affirmer l'hydroélectricité** comme la première des énergies renouvelables avec ses qualités d'être pilotable, flexible et stockable
- 2 | **Analyser en détail l'impact de l'intermittence** dans le mix électrique et proposer une analyse du système énergétique complet
- 3 | **Investir massivement dans l'hydro et rémunérer à sa juste valeur** les nouveaux services systèmes rendus par l'hydroélectricité
- 4 | **Promouvoir la filière industrielle** issue de l'écosystème alpin et favoriser son développement au niveau international
- 5 | **Multiplier les projets d'hybridation** des énergies renouvelables associant l'hydroélectricité pilotable aux sources intermittentes solaire ou éolien et au stockage
- 6 | **Affirmer l'hydro comme l'énergie renouvelable** la mieux intégrée à notre société par ses répercussions sur le développement du tourisme, de l'irrigation, de l'agriculture et de l'économie des territoires
- 7 | **Stimuler l'innovation** dans les PME de l'hydro par des projets transversaux structurants et associant des compétences diversifiées





Ce Livre Blanc a été réalisé par l'Association
HYDRO 21,
www.hydro21.org

Secrétariat Hydro 21
C/o Artelia Eau & Environnement
6 rue de Lorraine
38130 Échirolles - France

En collaboration avec
ARTELIA
AUTOMATIQUE & INDUSTRIE
BATTAGLINO
CIC ORIO
EDF UNE RIVIÈRE UN TERRITOIRE
GENERAL ELECTRIC
PONTICELLI

Et avec le soutien de l'Agence
Auvergne-Rhône-Alpes Entreprises
pour la partie 1.



Chantier de l'aménagement hydraulique de Romanche Gavet, ©EDF - Christophe Huret