

Impacts des changements climatiques et de la libéralisation du marché de l'électricité sur l'hydroélectricité

Ludovic Gaudard

L'hydroélectricité est un pilier de l'énergie suisse, même si son avenir est instable. La production moyenne de 36 TWh an⁻¹ représente environ 56% de l'électricité suisse (années 2002–2012, (SFOE, 2012)). De plus, les revenus annuels reversés aux collectivités publiques sous forme de taxes et de redevance représentent plus de 560×10^6 CHF an⁻¹ (années 2006–2012, (SFOE, 2012)). Dans la perspective d'une sortie programmée de l'énergie nucléaire, le rôle de l'hydroélectricité est accru. Cependant, l'ouverture des marchés à la concurrence, la nouvelle politique énergétique, le renouvellement des concessions, les nouvelles technologies ainsi que le réchauffement climatique sont des sources d'incertitude. Afin de mieux préparer la transition énergétique et les scénarios à long terme, une évaluation de ces impacts et risques est nécessaire. Cette thèse analyse cette problématique complexe tout en se concentrant sur les changements climatiques et la libéralisation des marchés de l'électricité.

Les changements climatiques vont affecter l'hydroélectricité de diverses manières. Le ruissellement va différer en terme de volume annuel et de saisonnalité (Beniston, 2012). Ceci influence la gestion des installations avec réservoir et leurs revenus (Gaudard et al., 2013b). La hausse des températures modifie également la consommation d'électricité qui est liée aux variables météorologiques (Pardo et al., 2002). Le profil annuel de la demande pourrait changer et les barrages devront s'y adapter. Pour finir, le réchauffement climatique peut apporter des opportunités. De nouveaux lacs vont se former dans des zones actuellement recouvertes de glaciers (Haeberli et al., 2012). Ainsi, une installation de pompage-turbinage est envisagée en amont du barrage actuel de Mauvoisin (Gaudard, 2014b; Terrier et al., 2011).

La libéralisation des marchés de l'électricité est un changement de paradigme. Par rapport au monopole public, les investissements dans les technologies intensives en capital sont défavorisés (Finon, 2009). La volatilité des prix et les incertitudes augmentent, ce qui influence aussi les investissements. Une analyse détaillée de ces changements et de leurs impacts sur l'hydroélectricité permet de planifier la sortie de l'énergie nucléaire.

Une première approche englobe tous les 'drivers' en se basant sur la littérature scientifique et des rapports officiels. La méthode systémique permet d'identifier les variables relevantes et leurs interactions. Cette approche est essentiellement qualitative (Gaudard and Romerio, 2013a)

L'impact des changements climatiques et de la libéralisation des marchés de l'électricité est analysé par des méthodes spécifiques et quantitatives. Les données de ruissellements ont été fournies suivant divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (Gabbi et al., 2012; Fatichi et al., 2013). Les conséquences du réchauffement sur la demande en électricité sont analysées par des méthodes économétriques combinées à la méthode des deltas de la distribution empirique (Gaudard et al., 2013b; Keller et al., 2005). La projection des prix de l'électricité considère divers modèles de séries temporelles, dont ARMA-GARCH (Bollerslev,

1986; Box and Pierce, 1970), mean-reversing (Uhlenbeck and Ornstein, 1930), mean-reversion jump diffusion (Kaminski, 1997), mouvements géométriques browniens (Black and Scholes, 1973). Sur la base de ces données, un modèle de gestion du réservoir est optimisé par un algorithme de seuil accepté (Dueck and Scheuer, 1990; Moscato and Fontanari, 1990). Des revenus annuels et des niveaux du réservoir sont obtenus. L'incertitude sur les premiers est discutée à l'aide de matrices d'incertitude (Walker et al., 2003). Les revenus annuels servent également à effectuer une analyse d'investissement, par le biais de la valeur actuelle nette et des options réelles (Quiry et al., 2011; Dixit and Pindyck, 1994).

Dans les cas étudiés en Suisse et Italie, les changements climatiques ont un impact limité. Les caractéristiques locales sont importantes. Par exemple, le volume annuel de ruissellement peut varier de -21% à $+15\%$ à moyen terme selon le bassin versant (Gaudard et al., 2013c). Cependant, une gestion appropriée des installations hydroélectriques permet de réduire les pertes en terme d'énergie produite et de revenus (Gaudard et al., 2013b). Les incertitudes sont également faibles, car les divers scénarios d'émission de gaz à effet de serre apportent peu de variation dans les prévisions à long terme (Gaudard et al., 2014a). L'impact de l'augmentation des températures sur la consommation d'électricité est également limité, sauf si l'on induit des changements de comportement (Gaudard et al., 2013b).

Les prix de l'électricité sont une source d'incertitude importante (Gaudard et al., 2014a). Les projections à long terme sont difficiles, car les séries temporelles historiques sont relativement courtes et le design du marché évolue encore. Les projets de pompage-turbinage sont également particuliers, car ils dépendent à la fois du prix moyen et de l'écart entre le prix de pointe et hors pointe (Gaudard, 2014b). Les méthodes ont été adaptées à cet effet. Les résultats d'un projet en amont du barrage actuel de Mauvoisin montrent que les conditions de marché actuelles compromettent les investissements dans le stockage de l'énergie. Cependant, la valeur d'option de la concession reste positive (Gaudard, 2014b).

Cette thèse cible trois publics différents, c'est-à-dire les scientifiques, les instances politiques et les opérateurs hydroélectriques. L'intégration d'un modèle économique avec des projections de ruissellement est nouvelle. Il apporte des résultats intéressants comparés aux modèles utilisés jusqu'ici dans le cadre des changements climatiques. La combinaison d'approches quantitative et qualitative est également un point fort de ce travail. Pour les autorités publiques, l'intérêt principal est de pouvoir comparer les effets des changements climatiques et de la libéralisation du marché de l'électricité sur une base commune, à savoir les revenus annuels. Ceci devrait les aider dans leurs décisions futures sur la politique climatique et énergétique. Finalement, les opérateurs peuvent obtenir des informations intéressantes à propos de la gestion de leurs installations et à la planification de leurs investissements. Les résultats de ce travail peuvent donc éclairer certains débats actuels sur le renouvellement des concessions et la sortie de l'énergie nucléaire.

Impact of Climate Change and Electricity Market Liberalization on Hydropower

Ludovic Gaudard

Hydropower is a very important component of the Swiss energy mix, but its future is jeopardized by several factors. The mean production of 36 TWh year^{-1} represents about 56% of the domestic electricity supply (years 2002–2012, SFOE (2012)). Furthermore, taxes and royalties represent an income of about $560 \times 10^6 \text{ CHF year}^{-1}$ for cantons and municipalities (years 2006–2012, SFOE (2012)). In principle, with the phasing-out of nuclear energy, hydropower should play an even more important role. However, the opening of the electricity markets to competition, a new energy policy, the water concessions end, the new technologies, and the global warming create significant uncertainties. To carry out the transition and to clarify the long-term scenarios, an assessment of the risks and opportunities is necessary. This thesis analyses these complex dynamics, and focuses more particularly on the problems related to climate change and the liberalization of electricity markets .

Climate change may affect the hydropower in different ways. The runoff's annual volume and seasonality will change (Beniston, 2012). They affect both the management of hydropower plant with reservoir and revenue creation (Gaudard et al., 2013b). The temperature rise also alters the consumption in electricity, partially determined by meteorological variables (Pardo et al., 2002). However, global warming may bring about new opportunities. New lakes will appear in areas covered at present by glaciers (Haeberli et al., 2012). This means that pumping-storage installations may be considered, as in the case of Mauvoisin, upstream of the existing dam (Gaudard, 2014b; Terrier et al., 2011).

The opening of electricity markets to competition represents a change in paradigm. Investments in capital-intensive technologies become more challenging compared to monopoly (Finon, 2009). Investments are affected by high uncertainty and price volatility. A deep analysis of these dynamics and their impact of hydropower are essential to plan the phasing out of nuclear power.

A general analysis of all the drivers that can affect hydropower is first carried out on the basis of a rich literature, including scientific articles and official reports. A systemic approach allows the identification of the most relevant variables and their interactions. This approach is essentially qualitative (Gaudard and Romerio, 2013a).

The impacts of climate change and market liberalization are analysed by means of specific quantitative methods. Runoff data are related to several greenhouse gas scenarios (Gabbi et al., 2012; Fatichi et al., 2013). Econometric tools and the empirical distribution delta method were used to assess the impact of climate change on the demand of electricity (Gaudard et al., 2013b; Keller et al., 2005). Electricity's price forecasting is based on various time series models: ARMA-GARCH (Bollerslev, 1986; Box and Pierce, 1970), mean-reversing (Uhlenbeck and Ornstein, 1930), mean-reversion jump diffusion (Kaminski, 1997), and geometric brownian motion (Black and Scholes, 1973). On the basis on these data, a

management model is optimized by means of a threshold accepting algorithm (Dueck and Scheuer, 1990; Moscato and Fontanari, 1990) allowing for the annual revenue and reservoir level evaluation. The uncertainty related to revenue is discussed by means of an uncertainty matrix (Walker et al., 2003). Annual revenue is also used to carry out an investment analysis, based on the net present value approach and real options theory (Quiry et al., 2011; Dixit and Pindyck, 1994).

The case studies in Switzerland and Italy show that the climate change impact is relatively low. Local characteristics are important. For example, annual runoff volume may vary from -21 to $+15\%$ in the medium term depending on the considered catchment (Gaudard et al., 2013c). However, an appropriate management may significantly reduce energy production and revenue losses (Gaudard et al., 2013b). Uncertainties are also relatively low, because long-term forecasting is only slightly affected by the different greenhouse gas scenarios (Gaudard et al., 2014a). The impact of the temperature raise on electricity consumption, neglecting changes in human behavior, is also low (Gaudard et al., 2013b).

Electricity prices create more uncertainty (Gaudard et al., 2014a). Long-term forecasting is difficult, because historical time series are relatively short and market design is still evolving. Pumped-storage projects are unique in the fact that their turnover depends upon the mean price, as well as the spread between peak and off-peak prices (Gaudard, 2014b). Specific tools of analysis were used to address these particularities. Results from a project upstream from the Mauvoisin dam show that present market conditions jeopardize investment in energy storage. The option value of the concession is positive (Gaudard, 2014b).

This thesis addresses three audiences: scientists, policy makers and hydropower companies. To our best knowledge, the integration of the runoff's forecasting within an economic model is new. It generates interesting results compared to former models used in the framework of climate change. The originality of the thesis also lies in coupling quantitative and qualitative approaches. For policy makers, an interesting outcome is the comparison between the impacts of climate change and market liberalization on a same basis, i.e. revenue generated by hydropower plants. Hydropower companies may find useful results concerning the reservoir's management and new investments. These are inputs that may fuel the generally hot debates on water concession's renewal and the new Swiss energy strategy.

Bibliography

- Beniston, M., 2012. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology* 412, 291–296.
- Black, F., Scholes, M., 1973. The pricing of options and corporate-liabilities. *The Journal of Political Economy* 81, 637–654.
- Bollerslev, T., 1986. Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of econometrics* 31, 307–327. doi:{10.1016/0304-4076(86)90063-1}.
- Box, G., Pierce, D., 1970. Distribution of residual autocorrelations in autoregressive-integrated moving average time series models. *Journal of the American Statistical Association* 65, 1509–1526.
- Dixit, A., Pindyck, R., 1994. *Investment under uncertainty*. Princeton University Press.
- Dueck, G., Scheuer, T., 1990. Threshold accepting. a general purpose optimization algorithm superior to simulated annealing. *Journal of Computational Physics* 90, 161–175.
- Fatichi, S., Rimkus, S., Burlando, P., Bordoy, R., Molnar, P., 2013. Elevational dependence of climate change impacts on water resources in an alpine catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 10, 3743–3794.
- Finon, D., 2009. European low carbon strategies in liberalized electricity industries : lessons about the efficiency of the market paradigm, in: *Electricity Policy design*. University of Toronto Press.
- Gabbi, J., Farinotti, D., Bauder, A., Maurer, H., 2012. Ice volume distribution and implications on runoff projections in a glacierized catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 4543–4556.
- Gaudard, L., 2014b. Climate change: an opportunity for new investment in hydropower submitted.
- Gaudard, L., Gabbi, J., Bauder, A., Funk, M., Gilli, M., Romerio, F., 2014a. Long term uncertainty of hydropower revenue following climate change and electricity market liberalization submitted.
- Gaudard, L., Gilli, M., Romerio, F., 2013b. Climate change impacts on hydropower management. *Water Resources Management* 27, 5143–5156.

- Gaudard, L., Romerio, F., 2013a. The future of hydropower in europe: Interconnecting climate, markets and policies. *Environmental Science and Policy*, online, in press .
- Gaudard, L., Romerio, F., Dalla Valle, F., Gorret, R., Maran, S., Ravazzani, G., Stoffel, M., Volonterio, M., 2013c. Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian alps. *Science of the Total Environment* .
- Haerberli, W., Schleiss, A., Linsbauer, A., Künzler, M., Bütler, M., 2012. Gletscherschwund und neue seen in den schweizer alpen: Perspektiven und optionen im bereich naturgefahren und wasserkraft. *Wasser Energie Luft* , 93–102.
- Johnson, B., Barz, G., 1999. Selecting stochastic processes for modelling electricity prices, in: *Energy Modelling and the Management of Uncertainty*. Risk Books, London.
- Kaminski, V., 1997. The challenge of pricing and risk managing electricity derivatives, in: *The US Power Market*. Risk Books, London.
- Keller, F., Goyette, S., Beniston, M., 2005. Sensitivity analysis of snow cover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain. *Climatic Change* 72, 299–319.
- Moscato, P., Fontanari, J., 1990. Stochastic Versus Deterministic Update in Simulated Annealing. *Physics Letters A* 146, 204–208.
- Pardo, A., Meneu, V., Valor, E., 2002. Temperature and seasonality influences on spanish electricity load. *Energy Economics* 24, 55–70.
- Quiry, P., Le Fur, Y., Salvi, A., Dallochio, M., Vernimmen, P., 2011. *Corporate Finance: Theory and Practice*. John Wiley & Sons.
- SFOE, 2012. *Swiss statistics of electricity 2012*. Swiss Federal Office of Energy.
- Terrier, S., Jordan, F., Schleiss, A., Haerberli, W., Huggel, C., Künzler, M., 2011. Optimized and adapted hydropower management considering glacier shrinkage scenarios in the Swiss Alps.
- Uhlenbeck, G., Ornstein, L., 1930. On the theory of brownian motion. *Physical Review* 36, 823–841.
- Walker, W., Harremoës, P., Rotmans, J., Van Des Sluijs, J., Van Asselt, M., Janssen, P., Kraye Von Krauss, M., 2003. Defining uncertainty - a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment* 4, 5–17.