

## **La flexibilité dans les systèmes électriques bas-carbone : modélisation et analyse économique**

Alors que les systèmes électriques reposaient historiquement sur une production pilotable issue de centrales thermiques ou hydrauliques, la décarbonation profonde que ces derniers ambitionnent d'atteindre nécessite le déploiement massif de sources d'énergies renouvelables (EnR) intermittentes. La production de ces dernières étant indépendante de la volonté des producteurs et soumise aux erreurs de prévision, elle provoque d'importants changements dans le système électrique qui doit être plus flexible pour pouvoir s'adapter à cette offre fluctuante. Alors que ces considérations restaient jusqu'alors peu prégnantes du fait de la relative faible part de la production EnR par rapport aux autres moyens de production, la situation est vouée à changer dans un avenir proche. On perçoit ainsi déjà certaines limites au développement des EnR dans les pays où ce dernier a été très rapide, comme en Allemagne par exemple, qui connaît des épisodes de prix négatifs de plus en plus fréquents. Ainsi, la poursuite du développement conjoint des EnR sur le territoire européen est conditionnée au développement d'offres de flexibilité pour assurer à la fois le bon fonctionnement du système sur le court terme et son développement sur le long terme. Les sources de flexibilité sont de natures variées et reposent par exemple sur l'hydroélectricité, la génération thermique, la modulation de la production nucléaire, l'effacement de la demande, le stockage. L'ambition de cette thèse est d'analyser ces différents moyens de flexibilité d'un point de vue technico-économique pour mettre à jour leurs potentiels respectifs ainsi que les incitations possiblement nécessaires à leur développement.

### **Low-carbon power system flexibility: modelling and economic analysis**

While power systems have historically relied on dispatchable production from thermal or hydroelectric power plants, the deep decarbonisation that they aim to achieve requires the massive deployment of intermittent renewable energy sources (VRE). The production of the latter being independent of the producers' will and subject to forecasting errors, it causes major changes in the electricity system, which must be more flexible in order to adapt to this fluctuating supply. While these considerations have been of little importance until now because of the relatively small share of VRE production compared to other means of electric generation, the situation is set to change in the near future. Certain limits to the development of VRE can already be seen in countries where this spread has been made at a steady pace, such as Germany, which is experiencing increasingly frequent negative price episodes. Thus, the continuation of the joint development of VRE on the European territory is conditional on the development of flexibility offers to ensure the proper functioning of the system in both the short term and in the long term. The sources of flexibility are of various natures and include hydroelectricity, thermal generation, modulation of nuclear production, demand shifting and storage. The ambition of this thesis is to analyse these different means of flexibility from a technical-economic viewpoint in order to update their respective potentials as well as the possible incentives necessary for their development.

Thèse financée par la fondation des Mines et la Chaire Économie du Climat, encadrée par Prof. Olivier Massol et Sébastien Lepaul, à l'école doctorale Interfaces, CentraleSupélec.