

► Limiter l'injection d'énergie par un parc éolien ou un parc de panneaux solaires va ainsi soulager momentanément le réseau. Cela se traduit par un gain pour le producteur sur le coût et le délai de raccordement par rapport à un raccordement classique. Le producteur s'engage de son côté à respecter les limitations demandées par Enedis et dont le volume est inscrit dans son contrat de raccordement. L'offre ORA est en cours d'industrialisation après des expérimentations menées sur trois zones en France, la plus avancée se trouvant en Vendée où le parc éolien de Chauché et la centrale photovoltaïque de Talmont-Saint-Hilaire ont bénéficié d'un raccordement plus rapide et moins cher. L'offre sera prochainement disponible suite à la toute récente finalisation du cadre réglementaire dans le code de l'énergie français.

EXPÉRIMENTATIONS EN COURS

Mais d'autres flexibilités se mettent en place, en amont des producteurs, au niveau des postes sources, qui constituent l'interface entre le réseau de RTE et le réseau de distribution. «Ce sont des ouvrages mutualisés», explique Juliette Chatel, du département Raccordement des producteurs du pôle Transition énergétique d'Enedis. La problématique est différente, car les frais engagés pour redimensionner un poste source sont plus importants qu'au niveau des câbles HTA, et sur l'ensemble du réseau basse tension en général. Par ailleurs, un grand nombre de clients de tout type (pas seulement les producteurs d'EnR) sont concernés. L'idée, là encore, est d'optimiser l'existant et les investissements à venir. Grâce à la connaissance dynamique que nous avons de l'état du réseau, nous allons solliciter les acteurs pour qu'ils limitent de temps à autre leur production. C'est le projet Reflex.» Contrairement à l'offre ORA, que les clients auront le choix de souscrire ou non, la participation à Reflex sera automatique et permettra à l'ensemble des producteurs se raccordant sur un même poste

source d'en bénéficier. En revanche, ils seront indemnisés de la perte due au courant non vendu. «Ce qui est normal, puisque leurs efforts profitent à tous», remarque Juliette Chatel. «Nous estimons que cela permettra d'économiser 30 % des investissements, soit 300 millions d'euros d'investissements d'ici à 2035, chiffre Hubert Dupin. Certes, ces économies ont un coût puisqu'environ 0,06 % de la production sera effacée afin de ne pas surcharger le réseau. Mais la valeur de cette énergie non injectée ne représente que 50 millions d'euros. Le bénéfice est donc évident.» Tandis que le distributeur est en attente d'un feu vert législatif, Reflex s'apprête à être testé sur deux zones, l'une dans les Landes et l'autre dans la Somme.

Globalement, au-delà des offres ORA et Reflex, il s'agit bien d'optimiser les investissements au fil du temps pour faciliter la mise en œuvre de la transition énergétique. «Avec l'accroissement rapide du nombre de producteurs, les investissements deviendront inéluctables», analyse Julien Lucas, du département Flexibilités. Mais, en attendant, les flexibilités offrent une alternative intéressante aux redimensionnements des installations. Ainsi, avant de renforcer un réseau, nous étudions systématiquement la solution «avec investissement» et «sans investissement mais avec flexibilités» pour voir si l'optimisation constitue une alternative technico-économique viable.»

DES FLEXIBILITÉS POUR LA RÉSILIENCE DU RÉSEAU

La flexibilité concerne la production, mais également la consommation. C'est le cas d'usage «Résilience» par exemple, décrit par Sinziana Carloganu, également du département Flexibilités. «Imaginons un poste source dont nous anticipons qu'il faudra lui adjoindre un transformateur supplémentaire dans quelques années, car la région se développe rapidement. Pour l'instant, ce n'est pas nécessaire... Mais que faire si un transformateur tombe en panne? Dans ce cas, le risque est de voir les transformateurs

restants ne pas pouvoir prendre complètement le relais, entraînant la coupure de nombreux clients. Pour remédier à cela, la solution est de recourir à des services de flexibilité le temps de résoudre la panne: en demandant à certains sites raccordés aux transformateurs encore en fonctionnement (consommateurs ou producteurs) de moduler leur charge, il est possible d'améliorer la reprise en réalimentant plus de clients et/ou de sécuriser l'alimentation de la zone.»

Cette solution permet aussi d'effectuer des travaux de maintenance. Mais si l'appel à la flexibilité limite les coupures, comment les mettre en place concrètement? «Pour une situation donnée, nous faisons un appel d'offres auquel tout utilisateur du réseau ou acteur de marché peut répondre, et notamment les agrégateurs qui regroupent plusieurs producteurs, reprend Jérôme Moizard. Mais il est par nature très localisé. Si nos besoins sont en Picardie, une offre des Bouches-du-Rhône ne nous apportera pas grand-chose! Nous risquons donc de nous trouver face à des appels infructueux.»

MULTIPLES APPELS D'OFFRES

D'où la nécessité de décrire au mieux ces appels d'offres, de manière à optimiser les chances d'avoir des réponses pertinentes. Un sujet complexe, car la nature des besoins du réseau varie grandement d'une région à une autre, en termes de produits recherchés et de valeur associée, intrinsèques à la configuration locale du réseau. Une diversité qui amène ainsi une grande variété de contractualisations possibles, et donc d'appels d'offres à imaginer.

En 2020, Enedis a publié une carte montrant cinq zones d'opportunité sur le territoire. «Nous avons sur chacune de ces zones une description détaillée des besoins, la puissance nécessaire, et pour combien de temps. Nous allons tester concrètement les appels d'offres que nous aurons mis au point, et la réponse du marché», explique Sinziana Carloganu. Sachant que ces flexibilités en action sur un territoire seront par nature provisoires. «En effet, conclut Jérôme Moizard. Sur une zone donnée, les flexibilités dureront jusqu'au renforcement effectif du réseau. En revanche, le concept même de flexibilité, qui amène une transformation profonde des métiers au service des collectivités, a vocation à durer des années, se transposant d'une zone à l'autre, en fonction de leur développement.»

**Optimiser les investissements
au fil du temps pour mieux mettre
en œuvre la transition énergétique.**

L'ESSENTIEL

> La matière est distribuée dans l'espace selon des motifs liés aux conditions dans l'Univers primordial.

> Elle forme en particulier des sortes de coquilles dont le rayon sert d'étalon de distance à travers les âges. En y associant la mesure de la vitesse d'éloignement

des galaxies de ces coquilles, il est possible d'étudier l'évolution de l'expansion cosmique.

> Grâce aux projets BOSS et eBOSS, ces mesures conduisent à mieux comprendre la nature de l'énergie sombre, qui semble compatible avec une constante cosmologique non nulle.

LES AUTEURS



KYLE DAWSON
professeur de physique et d'astronomie à l'université de l'Utah, aux États-Unis, et responsable du projet eBOSS



WILL PERCIVAL
directeur du centre d'astrophysique de l'université de Waterloo et membre de l'institut Périclète, au Canada

La plus grande carte de l'Univers

Retracer 11 milliards d'années d'histoire cosmique !

Tel est le défi relevé par les astronomes qui ont mesuré la distance et la vitesse de millions de galaxies. En prime, avec ces données, ils lèvent une partie du voile sur l'une des grandes énigmes de l'Univers : l'énergie sombre.

La distribution des galaxies, telle que les astronomes la cartographient avec le programme SDSS, est marquée par l'empreinte des conditions de l'Univers primordial et des variations de l'expansion cosmique (ici en vue d'artiste).



Comme Douglas Adams l'écrivait dans *Le Guide du routard galactique*, « L'espace est immense. Vraiment immense. On n'a franchement pas idée de sa stupéfiante et considérablement gigantesque immensité. » Malgré l'ampleur de ce défi, à l'instar de nombreux astronomes, nous avons consacré notre carrière à explorer l'Univers aux plus grandes échelles possibles, afin d'en estimer la taille et d'étudier la physique qui régit son évolution.

En juillet 2020, avec nos collègues, nous avons produit la plus vaste carte du cosmos jamais réalisée à ce jour. Elle s'appuie sur les données du relevé du ciel SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) démarré il y a près de vingt ans. Elle comprend le voisinage de la Voie lactée, mais aussi les confins de l'espace et tout ce qui se trouve entre les deux. Cette carte tridimensionnelle contient les positions de quatre millions de galaxies réparties, telles des bornes kilométriques, sur plusieurs milliards d'années-lumière, remontant ainsi dans le temps jusqu'à certaines des époques les plus reculées de l'Univers.

La carte montre que les galaxies ne sont pas distribuées au hasard. Au contraire, elles se regroupent selon des motifs particuliers : de longs filaments et des murs bidimensionnels. Ces structures délimitent des régions relativement vides et sombres. Les scientifiques pensent que ces motifs sont apparus avant même la naissance des galaxies, moins d'un milliard d'années après le Big Bang. En cartographiant le plus loin possible l'histoire cosmique, nous pouvons retracer la croissance de ces structures et en déduire certaines des lois fondamentales qui ont guidé leur évolution. Cet atlas des galaxies fournit des informations cruciales pour comprendre certaines des grandes énigmes de la physique, telles que la géométrie de l'Univers et la nature de l'énergie « sombre » (ou « noire ») à l'origine de l'expansion accélérée de l'espace.

DES NOYAUX DE SURDENSITÉ ET DES COQUILLES

Le programme SDSS, dont la cinquième campagne vient tout juste de démarrer, utilise le télescope de la fondation Sloan installé sur l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique. Parmi les différents volets du programme, le projet BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*, ou Suivi spectroscopique des oscillations baryoniques) et son successeur eBOSS ont mesuré la distribution des galaxies afin d'étudier l'histoire de l'Univers. L'idée est d'utiliser une propriété dans la répartition spatiale des galaxies qui est issue du phénomène dit d'« oscillations acoustiques baryoniques » (BAO).

Pour comprendre de quoi il s'agit, il faut s'intéresser à l'évolution du cosmos au cours de ses 380 000 premières années, en commençant une fraction de seconde après le Big Bang. À cette époque, l'Univers a connu une période d'expansion rapide et extrême (l'inflation), durant laquelle il s'est développé si vite que les échelles typiques du monde subatomique ont enflé d'un facteur gigantesque (la taille de l'Univers a été multipliée par 10^{26}) en seulement 10^{-32} seconde. Ainsi, de minuscules fluctuations quantiques dans la distribution de l'énergie ont été amplifiées jusqu'à des dimensions macroscopiques (de l'ordre de la taille d'une balle de golf).

Ces fluctuations ont donné naissance à des régions présentant des surdensités d'énergie et de matière. Ces zones ont alors grandi en attirant toujours davantage de matière, laissant vides les autres. Au cours des 13,7 milliards d'années qui ont suivi, ces régions denses de matière ont évolué et formé les vastes structures hébergeant de nombreuses galaxies : les filaments, les murs et les amas que nous observons aujourd'hui.



Cette carte tridimensionnelle contient les positions de quatre millions de galaxies

Les motifs des BAO sont dus à la façon dont la lumière et la matière ont interagi, notamment dans l'Univers jeune après l'inflation. Le cosmos contient deux types de matière : la matière ordinaire (aussi nommée « matière baryonique », composée d'atomes que nous avons l'habitude de côtoyer dans notre vie quotidienne), qui interagit avec la lumière, et la matière noire, sans interaction avec les photons (les particules de lumière) et donc transparente. Dans l'Univers primitif chaud et dense, les atomes étaient sous forme ionisée, les noyaux atomiques étant séparés des électrons. Les photons étaient piégés au sein de ce plasma du fait de leurs fréquentes interactions avec les particules chargées. Sous l'influence de la gravité, cette matière baryonique et les photons ont été attirés par les régions de