

Intégration des énergies renouvelables variables dans le système électrique : analyse bibliométrique et enquêtes auprès des acteurs

Emmanuel Hache, Angélique Palle

@ 52936

Une des questions essentielles soulevées par les exercices de scénarisation prospective concerne l'évolution du parc électrique et les conditions de l'intégration d'une part croissante d'électricité renouvelable. De nombreux travaux d'horizons variés, ont permis de réaliser une modélisation des parcs électriques avec des contenus croissants en énergies renouvelables (EnR) variables. Leurs méthodologies, leur granularité spatiale et temporelle comme leurs résultats sont très divers et parfois, en apparence au moins, contradictoires. L'objectif de cet article, issu d'une étude réalisée pour le Consortium de Valorisation Thématique (CVT) de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE) est notamment d'en proposer une analyse pour progresser dans la compréhension de ces résultats.

Introduction

Les énergies renouvelables comptent aujourd'hui pour 23 % de la production d'électricité mondiale (UNEP, 2017). Parmi elles, l'éolien et le solaire photovoltaïque, bien que leur contribution à la production mondiale d'électricité demeure en dessous des 5 % en 2016, ont connu sur les dix dernières années de forts taux de croissance de la puissance installée par an, de l'ordre respectivement de 23 % et 51 % en moyenne (WEC, 2016). Ces deux sources d'énergies sont dites intermittentes ou variables et leur intégration dans les réseaux d'électricité dans de larges proportions pose un certain nombre de questions technico-économiques, mais aussi politiques et comportementales, alors même que 194 pays ont fait le choix depuis décembre 2015 (et la conférence de Paris) de soutenir politiquement leur développement.

La profusion d'articles académiques sur le sujet, en forte croissance depuis les années 2000 (Figure 1), ainsi que la production de rapports d'agences gouvernementales, reflètent les préoccupations du corps politique et des sociétés sur ces questions. Dans ces nombreuses études, où les hypothèses diffèrent selon les espaces et les temporalités envisagés, la grande complexité technique du sujet et ses ramifications sociales et politiques rendent souvent difficile une approche globale de synthèse des questionnements de recherche en cours.

Le Consortium de Valorisation Thématique (CVT) de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE) a cherché à améliorer la compréhension de l'intégration des EnR variables dans les réseaux en répondant aux questions suivantes : quels sont les acteurs à l'origine des publications ? Comment collaborent-ils ? À quelles échelles cette intégration des EnR

variables aux réseaux doit-elle être envisagée ? Selon quelles méthodologies ces études sont-elles menées ? Quel peut être le potentiel des marchés des technologies ?

Cette étude repose sur une double analyse, bibliographique et bibliométrique, appuyée sur une enquête et des entretiens menés auprès des chercheurs travaillant sur le domaine. L'enquête a été menée entre juin et juillet 2017 sur un panel de 60 chercheurs, décideurs publics ou privés, entrepreneurs travaillant sur le système énergétique et identifiés grâce à leurs publications. L'objectif a été de confronter le contenu global de la littérature scientifique aux regards et aux projets des chercheurs sur les sujets à venir et les questions à résoudre, notamment en termes de modélisation des systèmes électriques. Le panel des réponses couvre la majorité des acteurs français travaillant sur la question (ADEME, CEA, CNRS, EDF, ENGIE, IFPEN, Mines ParisTech, RTE...) ainsi que des représentants de la recherche européenne,

américaine, australienne, sud-africaine et chinoise, diverses entreprises engagées dans la production d'électricité d'origine renouvelable variable et des ONG impliquées dans la lutte contre le changement climatique.

1. Analyse bibliographique et bibliométrique

La littérature scientifique publiée sur le sujet est vaste. Depuis 1978, selon la base de données Scopus (qui recense les publications « *peer-reviewed* » liées à l'éditeur Elsevier, soit environ 55 millions d'entrées) qui a servi de base à cette analyse, 9 744 articles, textes de conférences ou autres ressources « *peer-reviewed* » ont été publiés sur la question de l'intégration des énergies renouvelables variables dans les réseaux électriques. 80 % de cette littérature scientifique a été publiée depuis 2010, ce qui tend à démontrer l'intérêt académique sur ces questions actuellement. S'y ajoutent les études globales

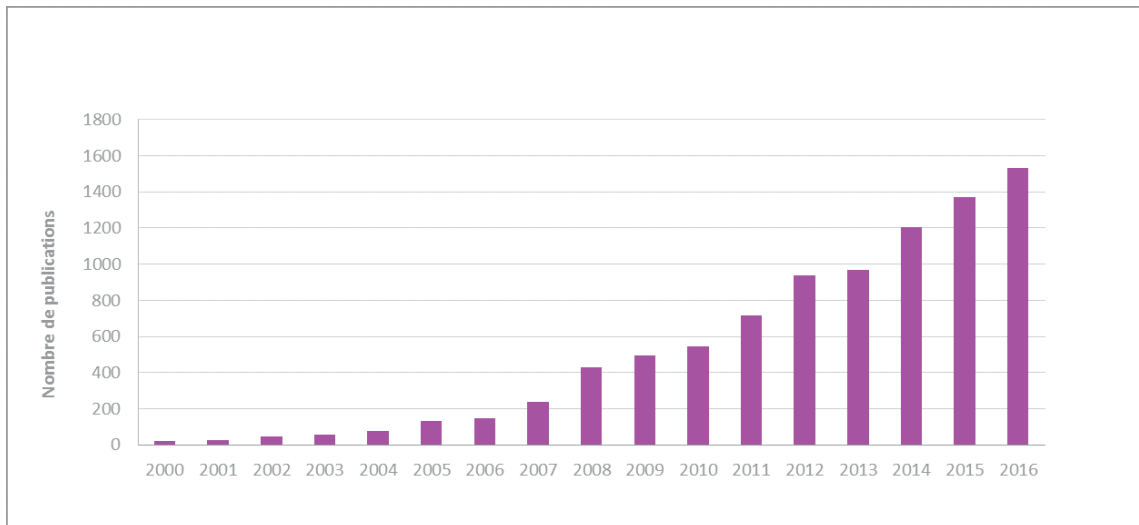


Figure 1. Croissance des publications mondiales de recherche (en anglais) sur l'intégration des EnR variables dans les réseaux électriques entre 2000 et 2016

(sur la base Scopus avec les mots clés suivants : « *intermittent* », « *renewable energy* », « *integration* »)

produites par les organismes gouvernementaux, internationaux, les organisations non gouvernementales (ONG) et les acteurs industriels du secteur de l'énergie.

Au sein de cette première base de données, au spectre volontairement large, nous avons mené des analyses bibliométriques à l'aide du logiciel de statistique et de *text-mining* Intellixir. Elles mettent en exergue le positionnement et les relations entre les différents acteurs produisant ces recherches, leur répartition géographique et les concepts dont elles traitent, etc.

1.1. Acteurs impliqués dans la recherche sur ce domaine

De nombreuses équipes internationales travaillent sur l'intégration des EnR variables dans les réseaux d'électricité. Elles ont des spécialisations, des centres d'intérêt et des hypothèses de recherche très hétérogènes. L'un des premiers objectifs de cette étude de cadrage a donc été de cartographier l'état de la recherche sur ce domaine, d'identifier les nœuds de collaboration et les centres de résultats, ainsi que les principaux États et institutions impliqués.

a. Principaux centres de résultats

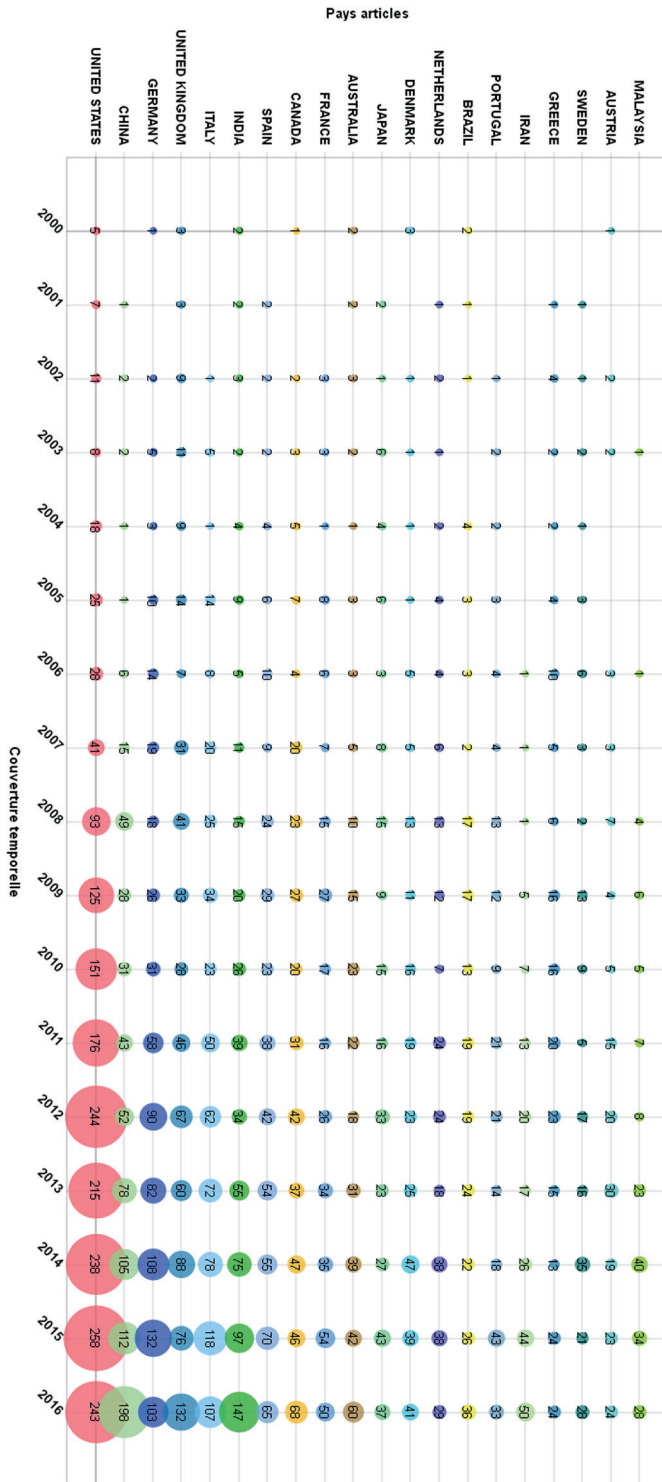
Les principaux producteurs de publications sur les EnR variables et leur intégration aux réseaux électriques sont les États-Unis qui dominent le classement des pays par le volume de publications parues depuis que la recherche s'est emparée du sujet. Ils sont depuis 4 ou 5 ans progressivement rattrapés par la Chine. Un second groupe de pays se détache ensuite, composé de l'Allemagne, du Royaume-Uni, de l'Italie et de l'Inde. La France se classe en 9^e position, dans un 3^e groupe de pays assez large oscillant autour d'une cinquantaine de publications par an. Les années 2009 et 2010 apparaissent comme des années charnières à partir desquelles la production scientifique croît fortement aux États-Unis puis, avec un temps de décalage d'un ou deux ans, en Chine et dans les pays

du second groupe. La France n'a pas pris ce tournant : si elle publiait autant que l'Allemagne ou le Royaume-Uni en 2009, en 2016 elle publie trois fois moins (Figure 2) sans que des facteurs explicatifs particuliers n'aient pu être mis en évidence dans le cadre de cette étude.

La polarisation de publications en termes de centres de recherche est un peu différente. Les centres de recherche américains et asiatiques dominent très largement le classement dont la tête est prise par l'Université de Beijing, devant le National Energy Technology Laboratory (NETL) du ministère de l'énergie américain. Le premier centre de recherche européen, celui de l'université d'Aalborg au Danemark, est en 7^e position, le premier centre français, le CNRS, occupant la 14^e place. Si l'Union européenne publie donc beaucoup sur le sujet comparé à d'autres régions du monde (en termes de publications agrégées), elle publie en revanche de façon dispersée.

Figure 2. Distribution temporelle par pays des publications sur les EnR variables dans les réseaux électriques entre 2000 et 2016

Source : Scopus/Intellixir



scandinaves et du Benelux ainsi que quelques équipes américaines. Ces *clusters* ne sont pas polarisés par une institution particulière. La France y participe peu. Fait notable, les deux pays européens qui publient le plus (l'Allemagne et le Royaume-Uni) sont aussi ceux qui collaborent le plus, et dont le réseau de collaborations est le plus décentralisé et le plus international, tout en restant cependant très européen.

b. Quel(s) acteur(s) impliquer ?

À la question « quels sont les acteurs les plus importants pour une intégration rapide des EnR variables aux réseaux d'électricité », plus de la moitié des répondants à l'enquête de l'ANCRE (dont 90 % se considèrent comme étant chercheurs) mentionne le corps politique et les gestionnaires de réseaux (Figure 4). La recherche et les chercheurs n'apparaissent qu'en 5^e position.

Les réponses à cette question indiquent un panel d'acteurs sans que l'un d'eux ne domine le paysage de façon claire. Il s'agit d'un trait important de cette enquête : pour la plupart

des questions, les réponses sont plurielles et les commentaires mettent en avant le caractère transversal et concerté des moyens devant être mis en œuvre. Les relations entre intégration des EnR variables aux réseaux électriques et le positionnement du corps politique ont cependant été régulièrement mentionnées au cours des entretiens menés.

2. Scénarios et modèles

La construction de scénarios est au premier plan des préoccupations de la recherche, ce que confirme l'étude bibliométrique. Parmi les questions les plus posées par le corps politique aux chercheurs, celle du pourcentage d'EnR variables qu'il serait possible d'intégrer aux réseaux sans en menacer la stabilité (et *in fine* la sécurité d'approvisionnement), du coût de cette intégration et enfin celle de ses possibles horizons temporels reviennent le plus souvent. Une partie des réponses que la recherche peut y apporter passe alors par la modélisation de scénarios d'intégration d'EnR variables sur différents types de réseaux et d'espaces.

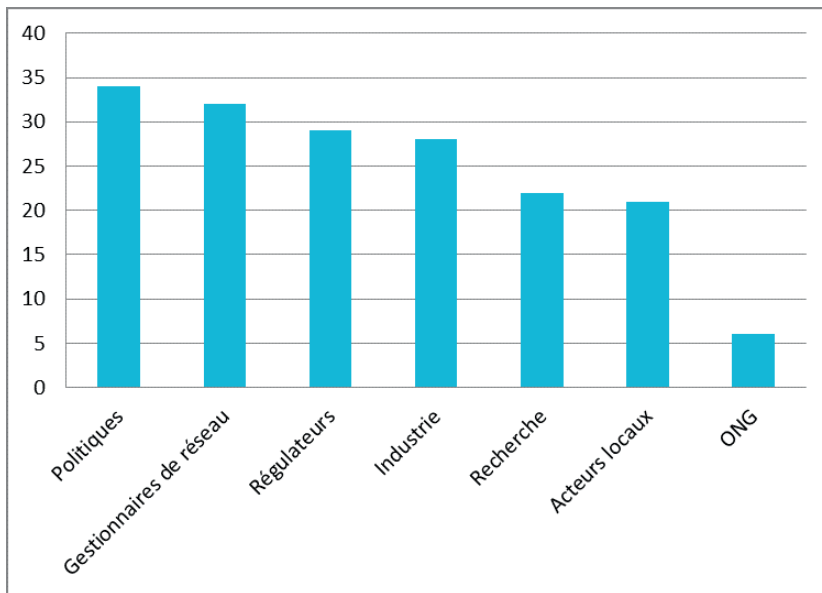


Figure 4. Enquête : acteurs estimés les plus importants pour une intégration rapide des EnR variables aux réseaux d'électricité (en nombre de réponses)

Source : Enquête ANCRE

2.1. Modélisations

L'enquête réalisée par l'ANCRE proposait une série de questions spécifiquement dédiées aux modélisateurs qui comptent pour 66 % des répondants. Dans les commentaires exprimés sur cette question reviennent plusieurs notions : la « vision intégrée » qui nécessite d'envisager l'ensemble des impacts hors d'un fonctionnement en silo ; la nécessité du lien entre modèles et scénarios ; la collaboration entre modélisateurs des systèmes énergétiques et modélisateurs des réseaux et la notion de flexibilité, nécessaire à l'intégration de l'intermittence.

Les chercheurs utilisent une large variété de modèles pour leurs simulations dont les caractéristiques et objectifs diffèrent. La Figure 5 en présente la répartition par typologies.

La littérature académique propose différentes classifications des modèles utilisés dans le domaine de l'économie, de l'énergie et de l'environnement (Percebois et Hansen (2010) ; Bhattacharyya et Timilsina (2010) ; Vieille-Blanchard (2011) ; Sinha et Chandel (2014) ; Nicolas (2016), etc.). Toutes sont

différentes, mais s'accordent néanmoins sur des éléments essentiels à inclure dans toute typologie : l'approche analytique retenue (modèle d'ingénieur ou modèle économique, *bottom-up* ou *top-down*, équilibre partiel ou équilibre général), et la méthodologie « numérique » (optimisation ou simulation).

Connolly et al. (2010) s'intéressent plus spécifiquement aux outils informatiques utilisés pour modéliser l'intégration des EnR dans les systèmes électriques. Ils recensent ainsi 67 outils et concluent qu'aucun d'entre eux ne permet de répondre à l'ensemble des questions relatives à l'intégration des EnR dans le système électrique et que chaque modélisateur utilise un outil qui lui permet de répondre à la ou aux questions qu'il se pose. Les outils ainsi dimensionnés concernent des objets largement différenciés (immeuble, système énergétique local, national ou théorique) et certains autres paramètres des modèles (description sectorielle, pas de temps, etc.) ne permettent pas de comparer les résultats.

La disparité des modèles de recherche et des résultats proposés est souvent difficile à lire par le corps politique qui peine

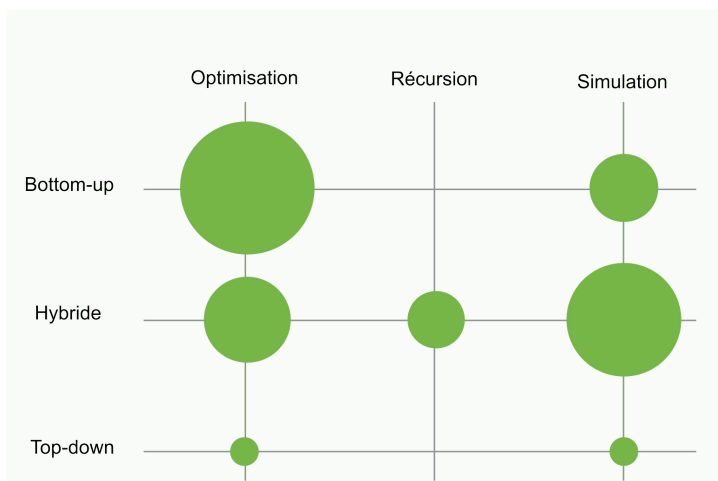


Figure 5. Répartition des modèles par type

Source : Enquête ANCRE

à la transformer en une action publique. Selon l'enquête de l'ANCRE, cette disparité s'explique par de nombreux facteurs.

Le premier d'entre eux tient à la différence des hypothèses de départ. Il peut s'agir des bases de données utilisées relatives à l'évolution des coûts des technologies mais plus structurellement, les questions initiales posées à travers ces modèles diffèrent :

- Il peut s'agir de privilégier l'aspect physique (la modélisation du réseau) ou bien monétaire du modèle ;
- Certains sont efficaces pour observer le comportement d'un réseau sur une année donnée mais supportent mal de projeter dans le temps l'évolution du système à plus longue échéance ;
- D'une façon générale, le degré de raffinement temporel du modèle joue sur son efficacité et ses résultats : on modélise traditionnellement les réseaux au pas horaire, les modélisations infra-horaires restant largement du domaine des gestionnaires de réseau pour des simulations à court terme ciblées, en raison de la puissance de calcul demandée par de telles modélisations.
- Sur le plan spatial, les caractéristiques des réseaux (configuration, taille, maille plus ou moins dense, obsolescence, etc.) et des espaces envisagés (ensoleillement, population, occupation des sols, etc.) jouent grandement sur le dimensionnement des modèles et les résultats.

La majorité des commentaires émis par les chercheurs interrogés fait ainsi état d'un manque de maturité de la recherche sur ces questions dont l'étude est relativement récente (et qui demandent des outils complexes ainsi qu'une importante puissance de calcul), mais aussi d'une impossibilité structurelle à voir des questionnements différents apporter des réponses similaires. Les exercices de modélisation n'auraient ainsi pas vocation à donner les mêmes résultats mais à répondre à la diversité des questions que la recherche se pose ou à apporter des éclairages différents et complémentaires, selon les qualités et limites propres à tel ou tel modèle, sur une même

question. Il est ainsi frappant de constater qu'interrogés sur les possibilités de convergence à terme de ces différents modèles, certains chercheurs répondent que « les disparités montrent l'amplitude des incertitudes » sur le sujet et que la convergence est alors « une question d'approche politique ».

Un certain consensus émerge cependant chez les interrogés sur certains manques récurrents de ces modèles. La modélisation de l'impact des technologies émergentes est encore fragile et doit progresser pour accroître la solidité et la pertinence des projections. De même, le développement d'autres technologies bas carbone alternatives au développement éolien et solaire est très peu envisagé. Certaines des données de départ, notamment les bases de données économiques et celles concernant les caractéristiques des technologies employées (coûts, TRL, etc.), gagneraient à être harmonisées et plus largement partagées. D'une façon générale, un manque de transparence et de mise en commun des méthodologies et des données employées est souligné.

2.2. Classification des scénarios d'intégration

L'horizon temporel et l'échelle géographique constituent deux des variables structurales ayant le plus d'impact sur les résultats des scénarios d'intégration EnR.

a. Horizon temporel des scénarios

Sur les deux bases de données d'articles traitant de scénarios d'intégration d'EnR variables, les horizons temporels envisagés dépassent rarement le milieu du *xxi^e* siècle et 2050 semble être la référence majeure en vigueur pour les projections. Les scénarios 100 % EnR se projettent beaucoup moins dans le temps que ceux envisageant des taux d'intégration plus faibles, la moitié d'entre eux ne proposant pas d'horizon temporel. Cette différence s'explique en partie par les objectifs que se fixent ces scénarios : les scénarios 100 % EnR en font un objectif à atteindre a priori alors que les scénarios 30-80 % conduisent à

Intégration des énergies renouvelables variables dans le système électrique

cette proportion d'EnR sans nécessairement qu'il ne s'agisse d'un objectif en tant que tel. Le choix de 2050 comme horizon pour la majeure partie de ces scénarios est souvent un choix politique : il s'agit de montrer qu'il est possible d'atteindre un certain seuil d'EnR dans le mix à moyen terme.

b. Échelles géographiques des scénarios

Interrogés sur l'échelle la plus pertinente pour l'intégration des EnR variables aux réseaux, les chercheurs ayant répondu à l'enquête de l'ANCRE mettent en avant l'échelle locale, qui est pourtant paradoxalement l'une des moins étudiées. Ils ne tranchent cependant pas de façon nette entre les différents échelons proposés (Figure 6). Le caractère transversal du problème est souligné ainsi que la nécessité d'une gouvernance intégrant l'ensemble des échelles envisagées. Face à ce constat, les scénarios produits par la recherche concernent principalement l'échelle nationale. Les macro régions (rassemblant plusieurs pays) arrivent en deuxième position.

Les systèmes dits isolés ou insulaires, qui ne sont pas raccordés au réseau principal

et fonctionnent en autarcie (les petites îles ou autres espaces dont l'accessibilité pour des infrastructures de réseau est coûteuse, mais aussi des espaces comme le continent africain que l'on peut considérer comme une constellation de zones non interconnectées) font l'objet d'études de cas spécifiques : plus simples à modéliser, ils servent souvent de laboratoire pour l'ensemble de ces questions.

c. Cartographies des espaces étudiés

Trois pôles géographiques sont particulièrement étudiés par la recherche internationale : l'Europe, les États-Unis ainsi que la Chine et le Japon. L'Union européenne est très étudiée dans son ensemble ; en revanche, si les États européens sont étudiés dans le cas de scénarios 100 % EnR, ils le sont beaucoup moins pour des taux de pénétration plus faibles. Inversement, s'agissant du pôle asiatique, l'échelle étatique prédomine dans le cas de scénarios intégrant de 30 à 80 % d'EnR mais elle est peu présente dans le cas de scénarios 100 % qui se voient préférer une maille locale. L'Australie, absente des études intégrant de 30 à 80 % d'EnR, est au contraire très étudiée dans le cas de scénarios 100 %. Cette logique s'explique en partie

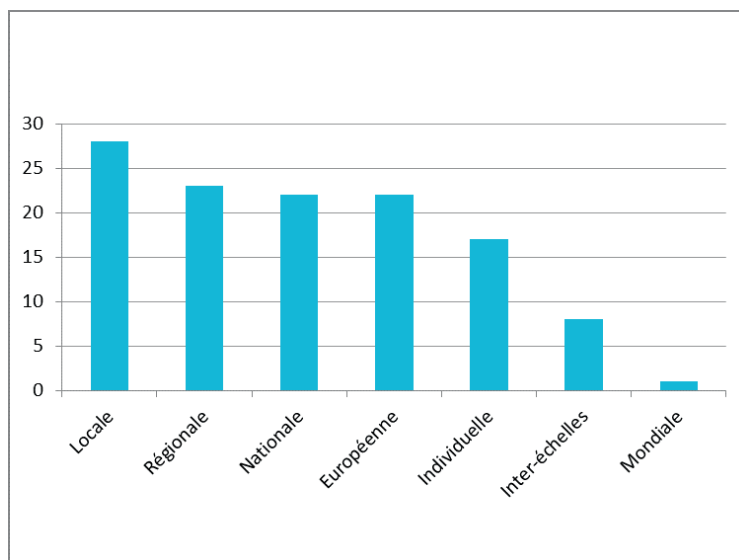


Figure 6. Échelle géographique la plus pertinente pour l'intégration des EnR variables aux réseaux (en nombre de réponses)

Source : Enquête ANCRE

par l'attitude adoptée vis-à-vis des scénarios : les scénarios 100 % EnR sont volontaristes dans la majeure partie des cas, ils concernent ainsi les pays qui adoptent des politiques de ce type (Union européenne, Australie). En revanche les États d'Asie dont la politique est moins volontariste envisagent surtout les scénarios 100 % EnR à des échelles très locales et beaucoup moins à l'échelle nationale. L'orientation de la politique publique d'un État influence ainsi fortement le type de travaux de recherches dont il fait l'objet.

La France est peu présente en tant que cas d'étude dans les articles à dimension internationale, qu'il s'agisse des scénarios 30 à 80 % EnR ou des scénarios 100 %. Si des études existent sur le sujet, elles paraissent majoritairement en français et ont une portée uniquement nationale. On a vu que la structure des collaborations françaises se faisait essentiellement en France et autour du CNRS qui polarise une grande partie de ces liens. Les résultats de cette cartographie des espaces étudiés par la recherche vont dans le même sens : la recherche française est dans ce domaine peu présente sur la scène internationale. Et ce, alors même que l'ensemble des acteurs interrogés estime que dans les facteurs les plus importants pour l'intégration des EnR variables aux réseaux figurent la transversalité (des échelles, des études, etc.) et la coopération ou coordination de l'ensemble des acteurs (sur le plan de la gouvernance mais aussi sur le plan de la recherche, notamment en ce qui concerne la modélisation et le partage de données communes). Ces deux éléments sont présentés comme la meilleure façon d'aborder la très grande complexité de ce problème et la multiplicité de ses impacts.

L'ensemble des différences observées dans les études sur l'intégration des EnR aux systèmes électriques repose également sur des problématiques liées au rôle historique qu'a joué la prospective dans les différentes constructions nationales. La prospective française est plutôt centrée sur les questions de planification nationale de long terme et, à la différence d'une prospective technologique orientée par le

complexe militaro-industriel comme aux États-Unis dans l'après-guerre, la discipline française et plus globalement européenne s'oriente elle vers une vision prospective plus humaniste et normative qui envisage les futurs non sous l'angle de la menace comme aux États-Unis, mais sous l'angle du progrès. Ces différences, à la fois sur la zone géographique étudiée, mais également sur le taux d'intégration des EnR dans les réseaux électriques (de 30 à 100 %) reflètent également l'état de la demande sociale dans un pays donné. En effet, la question des énergies renouvelables ne peut apparaître comme un simple objet économique ou technologique. L'engouement social actuel est tel que les questions économiques (objectif de minimisation des coûts) ou de décarbonation (baisse des émissions de CO₂) peuvent être reléguées à un second plan face au paradigme politique actuel guidé par la nécessité d'avoir des EnR variables dans les mix électriques nationaux.

d. Stockage

La question du stockage est, avec celle de la construction de modèles et de scénarios, l'une des plus étudiées du domaine de réflexion sur l'intégration des EnR aux réseaux d'électricité. Elle se pose à l'ensemble des échelons de la chaîne de valeur (production, transport, consommation) et le dimensionnement spatial (petites unités à l'échelle du consommateur, grandes unités situées à l'échelon de la production) autant que temporel (infra-journalier, journalier, saisonnier...) du stockage est un enjeu de long terme technique et réglementaire important. Les publications sur la thématique du stockage suivent très largement les tendances globales en termes d'origine des publications, et on n'y constate pas de spécialisation spécifique d'un État sur le sujet. Le même constat peut être effectué en ce qui concerne les concepts employés dans les publications sur le stockage : on y retrouve les tendances globales avec cependant un intérêt porté à l'optimisation et à la stratégie ainsi qu'aux émissions de gaz à effet de serre.

3. Questions de recherche

L'intégration de forts taux d'EnR variables aux réseaux électriques a des impacts sur l'ensemble de la chaîne de valeur du système électrique et concerne à la fois la production, le transport, la distribution et la consommation. Pour chacun de ces éléments de la chaîne, il existe des problématiques spécifiques techniques mais aussi des problématiques transverses, liées à d'autres éléments de la chaîne de valeur et qui peuvent relever du domaine technique, mais aussi concerner des questions de gouvernance, des aspects sociétaux, juridiques ou politiques. D'une façon générale, la question du coût et de la rentabilité économique de cette intégration se pose à tous les échelons de la chaîne, mais il est difficile de modéliser un optimum économique prenant en compte la combinaison des différentes évolutions de cette chaîne de valeur en cours actuellement, tant la complexité du problème est grande.

3.1. Quels facteurs d'intégration des EnR variables dans les réseaux ?

Parmi l'ensemble des facteurs d'accélération et de bonne intégration des EnR variables aux réseaux, les acteurs de la recherche du

secteur interrogés proposent le classement suivant (Figure 7). Ici encore, aucun facteur ne prend clairement le pas sur les autres et l'intégration apparaît comme le résultat de dynamiques multiples de même importance. Un panel de solutions émerge qui combine évolution des marchés et des modèles économiques, évolution de la régulation, baisse des coûts et évolution des technologies. Le faible poids des questions politiques et sociales dans les réponses pourrait s'expliquer en partie par la sous-représentation des chercheurs en sciences sociales dans le panel des répondants à l'enquête.

Les réponses précisent parfois ce qu'elles considèrent comme les éléments les plus importants dans certaines catégories. La gestion de l'inertie du système électrique, aujourd'hui assurée par les centrales classiques, pourrait l'être à terme par la conduite intelligente des installations renouvelables en lien avec des installations de production pilotables et un niveau de stockage permettant de compenser l'intermittence des EnR à moindre coût, tout en assurant à chaque installation (production, réseau, stockage...) un modèle économique viable. Hors des questions techniques, les réponses mentionnent la gestion de la réaction de la demande à un signal prix (« *demand response* »)

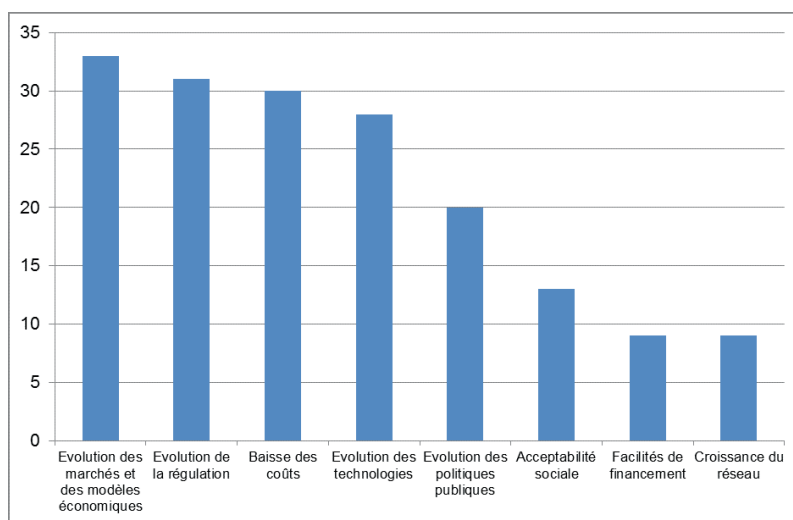


Figure 7. Questions les plus importantes pour l'intégration de forts taux d'EnR variables dans les réseaux (en nombre de réponses)

Source : Enquête ANCRE

encore faible aujourd'hui, ainsi que la nécessité pour les gestionnaires du réseau de distribution de changer une partie de leur culture d'exploitation pour s'adapter à l'intégration d'une partie significative des installations éoliennes et solaires sur les réseaux de distribution.

3.2. Quelles technologies ?

La même question de la priorisation des technologies importantes pour l'intégration des EnR variables a été posée aux acteurs du secteur (Figure 8). Les technologies concernant le stockage et la flexibilité arrivent en tête, mais de nombreux commentaires mentionnent l'impossibilité de réaliser l'intégration des EnR variables aux réseaux sans envisager l'ensemble de ces technologies de façon concomitante sachant que leur dosage optimal dépendra ensuite des conditions locales propres à chaque réseau.

Dans les commentaires additionnels, sont mentionnées les technologies spécifiques suivantes : le développement de lignes sous-marines à haute tension en courant continu, le développement du numérique et de l'électronique de puissance, le développement du *power to heat* avec réseaux de chaleur et de refroidissement, l'e-mobilité, le développement

des technologies existantes de stockage thermique et le développement des véhicules électriques à batteries.

3.3. Questions encore non traitées ou non résolues par la recherche

Les exercices de modélisation de l'intégration des EnR variables dans les réseaux d'électricité et de ses impacts prennent en compte différents éléments comme la stabilité du réseau, la dimension économique, le comportement des consommateurs, le design ou le fonctionnement des marchés électriques. À notre connaissance, aucun exercice ne prend actuellement en compte l'ensemble de ces éléments de manière concomitante et intégrée. Plusieurs problématiques doivent être mieux prises en compte pour renforcer la robustesse de ces scénarios.

a. Éléments techniques relatifs aux réseaux : stabilité, sécurité, flexibilité

La stabilité du réseau (et de sa fréquence) est l'un des éléments clés de l'intégration des EnR variables, dont l'intermittence de la production constitue un élément perturbateur. Elle recouvre notamment les questions du contrôle de la fréquence, de la planification et

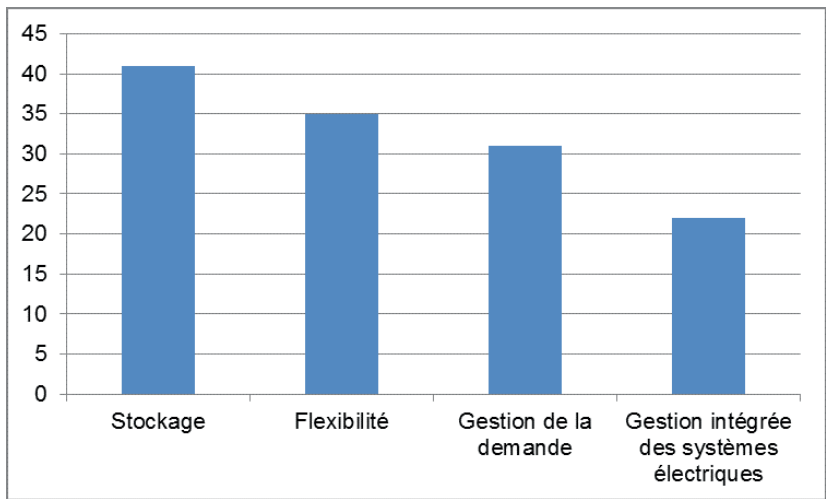


Figure 8. Technologies à développer pour une intégration de forts taux d'EnR variables dans les réseaux électriques (en nombre de réponses)

Source : Enquête ANCRE

de la construction de nouvelles lignes et de la gestion de l'énergie cinétique du réseau. Peu d'études envisagent la combinaison de ces facteurs de façon globale et la complexité de la question la rend difficile à modéliser. Par exemple, le stockage à court terme, la « *demand response* » ainsi que le dimensionnement du stockage de l'énergie (jour/nuit, inter-saisonnier) sont des aspects qui sont mentionnés dans les travaux mais qui sont très peu quantifiés ou dont le dimensionnement n'est pas chiffré, ce qui serait nécessaire pour les intégrer aux modèles en cours de développement.

La structure du marché concernant les outils de cette stabilisation n'est que très peu prise en compte : faut-il un marché centralisé ou bien un marché décentralisé avec, par exemple, des installations directement chez le consommateur (particulier ou industriel) ?

Les enjeux de flexibilité et de saisonnalité constituent un autre grand type de questionnements à développer.

Sur un plan purement technique, manque une prise en considération des possibilités d'optimisation de la capacité d'accueil des EnR variables au niveau des postes de transformation haute tension/basse tension dans les calculs de dimensionnement du réseau, (par exemple en effectuant le réglage en charge des transformateurs).

Le développement des services de flexibilité doit également être envisagé de façon plus large. Souvent seules quelques-unes des hypothèses de solutions de flexibilité (batteries ou autre type de stockage, *demand side management*, flexibilité de la production et notamment des vieilles centrales conventionnelles, interconnexion, etc.) sont envisagées, de même lorsque l'on considère l'évolution de ces solutions. On se concentre alors sur le secteur de l'électricité en laissant de côté des opportunités liées à d'autres sources d'énergie ou à des liens avec d'autres secteurs (transports, chaleur, etc.).

L'impact de ces aspects opérationnels sur les décisions d'investissements de long terme n'est souvent pas assez considéré, la question de la flexibilité n'est pas envisagée en amont mais intervient dans un second temps et est étudiée en aval, pour des décisions d'investissement données.

De même, la plupart des études se contentent d'un équilibre offre-demande statique, avec une sous-estimation des marges et réserves opérationnelles du réseau ou de la production pour gérer le système de façon dynamique. En général, le fonctionnement dynamique du système et des réseaux n'est pas traité, de même que les questions de système d'information et de pilotage des moyens de production, ainsi que les questions de *market design* (alors même que les coûts de transaction peuvent être non négligeables, par exemple pour les systèmes décentralisés diffus). Les réseaux de distribution sont moins étudiés que les réseaux de transport alors qu'ils absorbent une large partie de la production décentralisée des EnR et que la réponse en fréquence de ce type de production est très rapide.

Enfin la question du stockage se limite souvent à celle de la flexibilité. Le stockage en période de faible production reste un problème peu étudié car compliqué et cher (mais les études de marché doivent être adaptées à chaque situation) et le rôle des batteries, notamment associées aux flottes de véhicules électriques, doit être mieux appréhendé.

b. Aspects de marchés et financement

La question du *design* de marché le plus adapté à l'intégration de ces EnR variables aux réseaux reste peu étudiée et paraît loin d'être résolue. Cette incertitude crée un risque d'investissement dont la gestion amène à poser certaines questions : faut-il favoriser les produits de gestion et de partage du risque ? Avec quels types de contrats ? Des contrats d'achat d'électricité classiques (*Power Purchase Agreement*) ? De même, le caractère centralisé ou décentralisé du marché peut-il jouer sur

l'adaptabilité et l'adaptation du réseau ? Et à quel horizon temporel ?

Les aspects réglementaires et leur évolution sont particulièrement importants dans ce contexte, à la fois aux échelles nationales mais aussi dans leurs aspects locaux spécifiques à chaque région. Leur évolution et son impact sont cependant encore peu étudiés.

D'une façon générale, la dimension économique du problème de l'intégration des EnR variables aux réseaux électriques est encore mal prise en compte et les modèles sont insuffisamment détaillés, notamment en ce qui concerne : le surcoût lié au stockage dans le coût final de l'énergie, le coût de l'impact environnemental, sanitaire et sociétal des nouvelles lignes haute tension, le coût de l'intermittence des EnR, la valeur économique des MWh des capacités EnR variables supplémentaires. On impose souvent un niveau de développement (part en énergie électrique à une date précise) sans se préoccuper de la baisse de valeur progressive du MW d'EnR au fur et à mesure des installations, des éventuelles ruptures technologiques annoncées, de la bonne représentation des différents étages des marchés électriques pour développer le commerce des services de flexibilité (marché des réserves, marché d'ajustement, marché *intra-day*), ainsi que de l'ensemble des équipements électriques avec leur caractère de flexibilité (*ramping* des équipements conventionnels, aléas de production sur le PV et les types d'éolien) sur un marché modélisé en *unit commitment* et enfin de la demande et sa flexibilité éventuelle qui est de manière générale beaucoup moins étudiée en détail que le côté « offre » (moyens de production et de stockage et infrastructures de transport/distribution).

c. Aspects sociaux

Les comportements des citoyens et consommateurs face au développement de la production d'EnR variables sont peu pris en compte dans les exercices de modélisation ou scénarisation. Considérée comme un champ de recherches propres aux sciences sociales,

la thématique est encore ignorée par les concepteurs de scénarios. Pourtant les questions d'acceptabilité sociale par les citoyens (pour l'implantation de nouvelles infrastructures) et le changement de comportements des consommateurs (les choix écologiques portés par les individus ou la réactivité à un signal prix donné sur l'électricité) conditionnent les résultats des scénarios. Face aux craintes de « ras-le-bol fiscal » devant le coût de ces politiques, il est intéressant de se pencher sur l'influence du financement participatif sur le déploiement et la localisation des EnR. Le financement est une barrière importante (Lam and Law, 2016 ; Vasileiadou et al., 2016) et les nouveaux systèmes mis en place (les plates-formes de financement participatif notamment) qui se développent pour encourager le placement d'une épargne locale dans des projets EnR, sont très peu pris en compte dans les modèles et dans les scénarios de transition énergétique. Or ils recouvrent des enjeux de territorialité (critère de résidence des investisseurs et réserve d'épargne, ancrage local) et de participation citoyenne (engagement en capital et acceptation accrue des projets).

Enfin, la question de la gouvernance relative à la gestion de ces nouvelles sources de production intermittente doit être plus étudiée. L'installation d'infrastructures de production d'EnR variables a des impacts locaux (fonciers, paysagers etc.) et elle est associée à un vécu particulier des populations concernées. Il peut s'agir d'un sentiment de « reprise en main » à l'échelle locale sur les sources de production et d'approvisionnement en énergie ou, au contraire, d'un sentiment d'imposition par un pouvoir centralisé et lointain d'infrastructures qui ne servent pas les intérêts de la population locale (impact sur les cultures ou le tourisme par exemple). Ces questions relatives aux spécificités locales des projets nécessitent une prise en compte en amont des décisions d'investissement si l'on souhaite l'instauration d'un dialogue constructif entre parties prenantes autour de l'objectif commun de favoriser et faciliter le développement des EnR variables. Ce sont là

des thématiques importantes pour le déploiement des EnR variables qu'il faudrait intégrer dans les exercices de modélisation et scénarisation à des recommandations de politique publique (Ribeiro et al., 2018).

d. Besoin de transversalité et d'ouverture à d'autres systèmes

Les scénarios étudient souvent un aspect de la question de l'intégration des EnR variables (l'adéquation des moyens de production, la fiabilité du réseau électrique, le design des marchés de l'électricité, etc.) sans présenter de vision systémique de la question (qui prendrait en compte les questions techniques, réglementaires, comportementales, etc.). Cette approche en silos s'explique par le caractère très complexe et multiple des questions envisagées mais elle ne permet pas d'envisager la vision globale du problème et ignore les interactions ou effets de rétroaction entre ses différentes composantes.

L'intégration des EnR variables aux réseaux d'électricité est influencée par des éléments extérieurs au système électrique. Une prise en compte des autres besoins en énergie (chaleur, refroidissement, eau, énergie pour le transport etc.), des autres vecteurs d'énergie que l'électricité, des interconnexions possibles entre réseaux et conversions possibles entre vecteurs énergétiques (notamment en ce qui concerne le stockage) est nécessaire pour envisager l'intégralité des aspects du problème.

Conclusion

La profusion d'articles académiques sur le sujet, ainsi que la production de rapports d'agences gouvernementales, reflètent l'intérêt et les préoccupations des acteurs du secteur électrique, des chercheurs du domaine, du corps politique et des sociétés sur ces questions. L'étude bibliométrique fait apparaître une dynamique de publication récente et très éclatée à l'échelle mondiale. Le questionnaire et les entretiens réalisés avec

les acteurs du secteur mettent en avant l'importance du corps politique et des gestionnaires de réseaux, la réelle diversité des modèles et des méthodologies employées pour traiter le sujet et l'impossibilité actuelle de construire un modèle qui intègre l'ensemble des questionnements en cours.

La disparité des résultats des modèles employés actuellement est issue d'un manque de maturité de la recherche sur ces questions dont l'étude est récente (et qui demandent des outils complexes ainsi qu'une importante puissance de calcul) mais aussi d'une impossibilité structurelle à voir des questionnements différents apporter des réponses similaires. Toutefois, certaines des données de départ, notamment les bases de données économiques et celles concernant les caractéristiques des technologies employées (coûts, TRL, etc.), gagneraient à être harmonisées et plus largement partagées. D'une façon générale, un manque de transparence et de mise en commun des méthodologies et des données employées est souligné.

L'intégration de forts taux d'EnR variables aux réseaux électriques a des impacts sur l'ensemble de la chaîne de valeur du système électrique et concerne à la fois la production, le transport, la distribution et la consommation. Pour chacun de ces éléments de la chaîne, il existe des problématiques spécifiques techniques. Des problématiques transverses existent également et peuvent relever du domaine technique, des questions de gouvernance, des aspects sociétaux, juridiques ou politiques. La question du coût et de la rentabilité économique de cette intégration se pose à tous les maillons de la chaîne, mais il est difficile de définir un optimum économique prenant en compte la combinaison des différentes évolutions en cours de cette chaîne de valeur, tant la complexité du problème est grande.

RÉFÉRENCES

- Alazard-Toux, N., Criqui, P., Devezeaux de Lavergne, J-G, Hache, E., Le Net, E., Lorne, D., Mathy, S., Menanteau, P., Safa, H., Teissier, O., Topper, B. (2014), Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique, 115 p.
- Bhattacharyya, Subhes C., et Govinda R. Timilsina. (2010), « A Review of Energy System Models ». *International Journal of Energy Sector Management* 4 (4): 494-518. doi:10.1108/17506221011092742.
- Connolly, D., H. Lund, B.V. Mathiesen, et M. Leahy. (2010), « A Review of Computer Tools for Analysing the Integration of Renewable Energy into Various Energy Systems ». *Applied Energy* 87 (4): 1059-82. doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.026.
- Connolly, David, et Brian Vad Mathiesen. (2014), « A Technical and Economic Analysis of One Potential Pathway to a 100% Renewable Energy System ». Aalborg University Press. doi:10.5278/ijsepm.2014.1.2.
- Lam, P.T.I. Law, A.O.K. (2016), Crowdfunding for renewable and sustainable energy projects: An exploratory case study approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 11-20.
- Nicolas (2016), Robust energy and climate modeling for policy assessment, Thèse de doctorat, Université Paris-Ouest, Nanterre-La-Défense.
- Percebois et Hansen (2010), *Énergie : Économie et Politiques*, De Boeck, 850 p.
- Ribeiro, F., Ferreira, P., Araújo, M., Braga, A-C. (2018), Modelling perception and attitudes towards renewable energy technologies, *Renewable Energy*, Available online 3 February 2018, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.104>.
- Sinha, Sunanda, et S.S. Chandel. (2014), « Review of Software Tools for Hybrid Renewable Energy Systems ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (avril): 192-205. doi:10.1016/j.rser.2014.01.035.
- United Nations Environment Programme, <http://fs-unep-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-2016>, Consulté le 23 août 2017.
- Vasileiadou, E., Huijben, J.C.C.M., Raven, R.P.J.M. (2016), Three is a crowd? Exploring the potential of crowdfunding for renewable energy in the Netherlands, *Journal of Cleaner Production* 128, 142-155.
- Vieille Blanchard, Élodie. (2011), « À l'origine des modèles intégrés du changement climatique ». *Recherches Internationales*, n° 89 (mars) : 181-211.
- World Energy Council, *World Energy Perspectives 2016*, London.