

RAPPORT DE SYNTHÈSE

Contribution à la stratégie nationale de la recherche sur l'énergie (SNRE)

anRT
ASSOCIATION NATIONALE
RECHERCHE TECHNOLOGIE

 **FUTURIS**

**LE POUVOIR DE
L'INTELLIGENCE
COLLECTIVE**

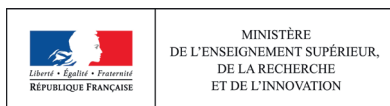
SEPTEMBRE / 2019
LES CAHIERS FUTURIS

Sous la présidence de M. Olivier Appert,
délégué général de l'Académie des technologies
M. Denis Randet, ANRT, co-président

M. Telman Azarmahd (Enedis/ANRT), rapporteur

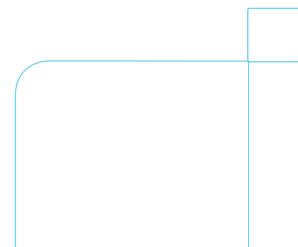
Ces travaux sont soutenus financièrement par les souscripteurs FutuRIS :

AICARNOT, AIR LIQUIDE, ANR, BERGER-LEVRAULT, BOUYGUES, BRGM, CEA, CNRS, CPU, CURIF, EDF, FRAMATOME, GE HEALTHCARE, INRIA, INSERM, INSTITUT MINES TELECOM, INSTITUT PASTEUR, IRIS SERVIER, MESRI, NOKIA, ORANGE, RENAULT, SAFRAN, SNCF, THALES, TOTAL, UBER

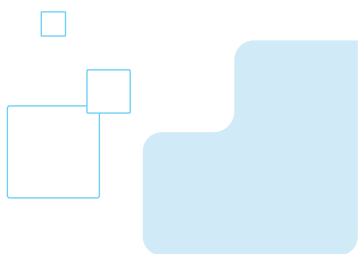


Le contenu n'engage que la responsabilité de l'ANRT en tant qu'auteur et non celle des institutions qui lui apportent leur soutien.

Liste des personnes impliquées dans le groupe de travail



Marie-Cécile Alvarez	ANCRE/CNRS
Nicolas Astier	CRE
Dominique Auverlot	France Stratégie
Julien Barreteau	DGEC
Christophe Boisseau	Enedis
Philippe Bourguignon	Engie
Franck Bourry	CEA
Alain Burtin	EDF
Christian Copin	GRTgaz
Antoine Dereuddre	CRE
Jean-Guy Devezeaux	ANCRE
Rémi Dreux	Engie
Frédéric Eve	Enedis
Dominique Finon	CIREN
David Game	RTE
Emilio Gomez	CESAMES
Claude Heller	Air Liquide
Yannick Jacquemart	RTE
Athanasios Kontopoulos	Air Liquide
Daniel Krob	CESAMES
Aurélien Lecaille	GRTgaz
Tanguy Le Guen	Engie
Michel Lippert	Saft
Pierre-Laurent Lucille	Engie
Arnaud Mainsant	ADEME
Pierre Mallet	Enedis
David Marchal	ADEME
Valéry Martin	EDF
Vincent Mazauric	Schneider Electric
Engin Molva	CEA
Xavier Montagne	MESRI
Christophe Périard	Météo France
Jean-Baptiste Pernot	Saft
Nicolas Raillard	The Shift Project
Frédéric Ravel	MESRI
Raphaël Rinaldi	Cap Energies
John Sandoval Moreno	Total
Karine Vernier	SPI
David Verstraeten	Total
Manuel Villavicencio	Paris-Dauphine
Monica de Virgiliis	CEA



SOMMAIRE

EXECUTIVE SUMMARY	6
RÉSUMÉ	7
INTRODUCTION	9
<hr/>	
1 / LA MODÉLISATION PROSPECTIVE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES COMME OUTIL D'ÉCLAIRAGE STRATÉGIQUE DANS LE CONTEXTE DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	13
1.1 Un besoin de modélisation pour tous les acteurs du système, mais de manière différente	13
1.2 Une pluralité de dimensions à prendre en compte	14
<hr/>	
2 / RETOURS D'EXPÉRIENCES ET CONDITIONS DE RÉUSSITE	17
2.1 De la diversité des modélisations utilisées pour la prospective énergétique	17
2.2 De l'importance des hypothèses et de leur transparence pour rendre les modélisations cohérentes, intelligibles, et exploitables	18
2.3 La nécessité d'une modélisation prospective multidimensionnelle	20
2.4 Les défis posés par une approche systémique des modélisations	25
<hr/>	
3 / ANALYSE SWOT¹ : PROPOSITION D'UN DIAGNOSTIC STRATÉGIQUE DES PROCESSUS DE MODÉLISATIONS PROSPECTIVES ENGAGÉS EN FRANCE ET EN EUROPE	27
3.1 Forces	27
3.2 Faiblesses	27
3.3 Opportunités	28
3.4 Menaces	28
<hr/>	
4 / CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	29
<hr/>	
ANNEXES / ÉLÉMENTS DE CONTEXTE ET DE CADRAGE	31
Enjeux de la transition énergétique en France	31
Prévision et prospective : deux démarches complémentaires	31

1- SWOT : acronyme anglais de *Strengths/Weaknesses/Opportunities/Threats* (Forces/Faiblesses/Opportunités/Menaces).

EXECUTIVE SUMMARY

The global energy system is undergoing far-reaching transformations, including climate change, the digital revolution, new lifestyles, a focus on local issues and the role of citizens, new international market players, and mass development of renewable energy due to changes in legislation and lower costs.

As a result, decision-makers need tools to help them direct French energy policy towards a low-carbon trajectory, and to prepare for the next multi-year energy programme due in 2023. Electricity system modelling is a key part of this ambition to determine the country's energy future. However, the diverse expectations of stakeholders, multiple modelling methods employed, and sometimes-opaque hypotheses mobilised by modelers can make these prospective exercises difficult to understand and generate a degree of mistrust.

The group's reflections and work have led to the following recommendations to ensure that models create value for all users:

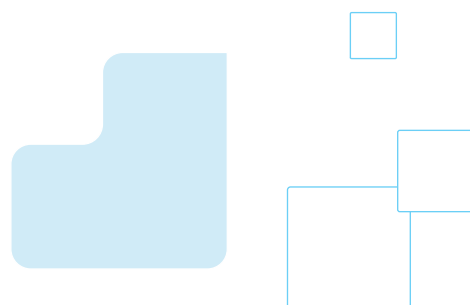
- **Greater transparency and rationalisation of the hypotheses** used in the models (following efforts to pool and compare non-competing data used by the actors).
- **Integration of systemic dimensions, which are neglected in some models** (including macroeconomic, multi-vector and multisectoral, climatic and HSS² dimensions).
- **Mechanisms to share and pool modelers' work at European scale**, which could begin in France at the initiative of public bodies as part of their public service role.

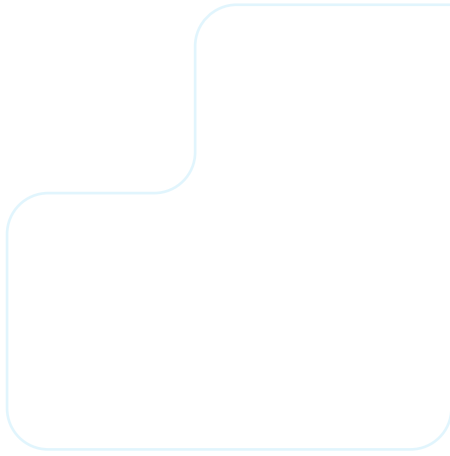
RÉSUMÉ

Face aux transformations profondes subies par le système énergétique mondial (lutte contre le réchauffement climatique, introduction du numérique, nouveaux modes de vie, émergence du fait local et du rôle du citoyen, arrivée de nouveaux acteurs internationaux sur les marchés, développement en masse des énergies renouvelables dû à la législation et la baisse de leur coût...), les décideurs ont besoin d'outils afin d'orienter la politique énergétique française vers une trajectoire bas carbone, notamment pour la prochaine PPE prévue d'ici 2023. Les modélisations prospectives des réseaux électriques s'insèrent ainsi pleinement dans cette ambition d'éclairage de l'avenir énergétique du pays. Cependant, la diversité des attentes des différents acteurs impliqués, la pluralité des méthodologies de modélisations utilisées, et parfois l'opacité quant aux hypothèses prises en compte par les modélisateurs rendent les exercices de prospective complexes à appréhender, et peuvent susciter une certaine méfiance.

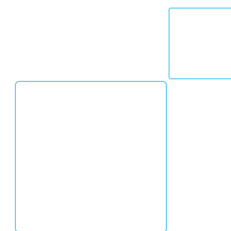
Les réflexions et travaux menés par le groupe préconisent les recommandations suivantes afin que les modèles puissent créer de la valeur pour tous leurs utilisateurs :

- **Une plus grande transparence ainsi qu'une rationalisation des hypothèses** utilisées dans les modèles (consécutive à un effort préliminaire de mise en commun et de confrontation des données non concurrentielles utilisées par les acteurs);
- **L'intégration de dimensions systémiques qui sont négligées dans certains modèles** (notamment les dimensions macroéconomique, multi-vecteur et multisectorielle, climatique, et SHS²) ;
- **Mécanismes de partage et de mise en commun des travaux des modélisateurs à une échelle européenne**, qui pourraient débiter en France à l'initiative d'acteurs publics, dans le cadre de leur mission de service public.





INTRODUCTION



L'impératif que s'est donné la France d'arriver à la neutralité carbone en 2050, dans la loi de juillet 2019 relative à l'énergie et au climat³, oblige à revoir l'ensemble du paysage de l'énergie. On attend de cette neutralité qu'elle réduise la part des combustibles fossiles, plus particulièrement par l'électrification des transports (automobile, mais aussi mobilité lourde), par la valorisation énergétique de la biomasse, ou encore par le rôle du biogaz et des biocarburants. Ainsi, la France s'est engagée, à l'instar des autres pays de l'Union Européenne, dans un développement des énergies renouvelables dans le cadre des paquets énergie climat européens 2020 et 2030⁴. La PPE⁵ prévoit d'augmenter la part des EnR dans le mix énergétique en France, avec en particulier une puissance installée des EnR électriques de 100 GW à l'horizon 2028.

À ces changements s'ajoute l'introduction du numérique dans le contrôle des réseaux électriques et des interfaces avec les consommateurs, sans oublier les effets que la digitalisation produit sur les modes de vie et sur le marché ainsi que les aléas météorologiques, auxquels l'électricité renouvelable sera plus sensible que la production thermique.

Bien que l'histoire et les situations diffèrent beaucoup selon les pays, ce nouveau paradigme fait partie d'un grand mouvement international, avec de nouvelles concurrences et de nouveaux marchés.

Quelles solidarités l'Europe arrivera-t-elle à construire ? Quelles positions prendra-t-elle face aux États-Unis, à la Chine, au développement de l'Afrique ?

Enfin, la production d'énergie implique des investissements considérables réalisés pour plusieurs dizaines d'années. Il faut donc essayer

de prévoir loin, tout en se souciant de maintenir à chaque instant la sécurité d'approvisionnement, et en prenant en compte la question du coût de l'énergie et de la fiscalité à mettre en place.

Les orientations et les décisions des pouvoirs publics s'expriment dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) d'août 2015, le Plan climat publié en juillet 2017, la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) 2019-2023, la stratégie nationale bas carbone (SNBC), publiée en 2015 et révisée en décembre 2018, ainsi que, plus récemment dans le projet de loi relatif à l'énergie et au climat de juillet 2019 qui prévoit notamment des objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050, de baisse des énergies fossiles, et de report de la baisse de la capacité nucléaire dans le mix de production français.

L'ANRT, dont la vocation principale est de réunir les entreprises, la recherche publique et les pouvoirs publics dans des réflexions communes, a constitué un groupe de travail en appui à cette révision. Le thème choisi était l'équilibrage et le contrôle du réseau électrique, profondément modifié par la croissance d'une production intermittente et décentralisée, l'électrification des usages avec notamment le déploiement de la mobilité électrique, et l'introduction du numérique.

En 2018, ce groupe a défini six priorités et alertes en matière de recherche et développement :

1. La stabilité du réseau et son pilotage

L'introduction des énergies éolienne et photovoltaïque, intermittentes, moins prévisibles, et ne fournissant pas par elles-mêmes d'énergie cinétique à la plaque européenne, peut fragiliser les conditions d'opération des systèmes

3- Projet de loi relatif à l'énergie et au climat visant à permettre la réalisation de la trajectoire vers la neutralité carbone, adopté par l'Assemblée nationale le 28/06/19 puis par le Sénat le 18/07/2019.

4- Plan d'action adopté en décembre 2008 et révisé en octobre 2014 par l'Union européenne, visant des objectifs pour 2030 de 40% de réduction des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990, 27% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique, et 27% d'efficacité énergétique.

5- Programmation Pluriannuelle de l'Énergie.

électriques et la résilience du réseau au-delà d'un certain seuil de pénétration⁶. Il est indispensable d'en modéliser les conditions de fonctionnement.

2. L'électronique de puissance

Face à la montée d'EnR variables, à une pénétration plus forte d'électronique et de numérique, l'électronique de puissance réalisant chaque couplage entre source de génération et réseau va jouer un rôle important pour le contrôle et le pilotage de réseaux plus décentralisés. L'affaiblissement de la production européenne de composants de puissance et la domination asiatique présentent un caractère inquiétant.

3. La croissance des besoins de flexibilité et de stockage

Assurer l'équilibre offre-demande au plus proche du temps réel va devenir plus contraignant dans un système laissant une part croissante aux EnR variables. À l'échelle de quelques heures, les mécanismes de flexibilité découlant de l'évolution des systèmes (combinaison de la modulation des sources d'énergie programmables, de l'effacement, des signaux de prix donnés aux consommateurs, ou encore du stockage par batteries) permettront d'y parvenir. Cependant, pour le stockage inter-saisonnier, avec le développement des énergies intermittentes, le problème demeure au-delà des capacités des STEP⁷. Le prix de solutions telles que l'hydrogène est encore loin d'être acceptable. La croissance du stockage sera tributaire de solutions technologiques performantes à la fois sur le plan économique et environnemental⁸.

4. L'intégration de la donnée et des nouveaux usages numériques

La décentralisation des sources de production variables et le développement des flexibilités sur la demande soulignent l'importance nouvelle du « fait local » (systèmes énergétiques locaux, nouveaux services sur le réseau de distribution, opportunités d'agrégation de flexibilités locales). L'usage de la donnée à granularité temporelle plus fine permet de mobiliser de nouveaux leviers de flexibilité (smart grids, pilotage d'EnR variables...) ainsi que de nouveaux produits et

services pour valoriser ces mécanismes sur les marchés de l'électricité, notamment à travers les données collectées par les compteurs intelligents et les objets connectés.

5. La cyber-sécurité

La multiplication des sources de production et l'introduction de moyens de pilotage numériques rend le réseau plus vulnérable au risque de cyber-attaques. Celles-ci peuvent être lourdes de conséquences, avec des *black-out* et un fonctionnement difficile à restaurer. Il est important de faire des recherches sur la détection des attaques, les parades à celles-ci, et la restauration du réseau.

6. La modélisation

L'importance et le coût des transformations obligent les pouvoirs publics et les entreprises à repenser leurs calendriers d'investissements à moyen et long terme. Pour cela, il est indispensable de s'appuyer sur des modèles d'aide à la décision.

Deux aspects sont notamment à considérer :

- **La construction de modèles de prospective** capables de produire une vision cohérente et suffisamment fiable du futur et des trajectoires technologiques possibles, afin d'orienter les politiques publiques, les efforts de R&D et les stratégies industrielles.
- **Les opportunités de nouveaux modèles d'affaires**, catalysées par les nouvelles technologies et les nouveaux usages de l'aval réseau.

6- Cette fragilité s'observe à partir d'un certain seuil de capacités EnR variables raccordées au réseau et dépend du mix existant tant au niveau de l'offre que de la demande. En France, elle évoluera en fonction part de nucléaire présente dans le mix à long terme : moins cette part sera importante, plus il y aura en contrepartie une part importante d'EnR variables qui auront un impact sur la conduite du système et la résilience du réseau.

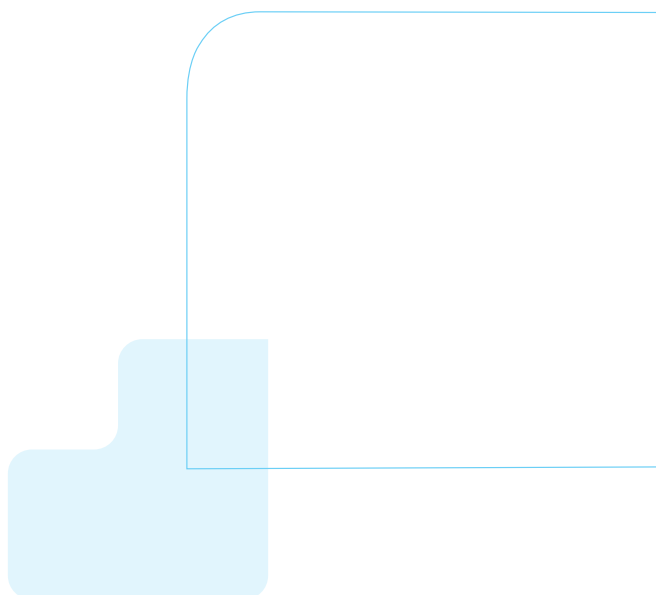
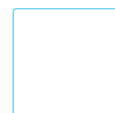
7- Station de Transfert d'Energie par Pompage.

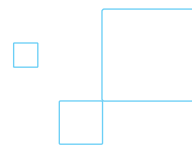
8- Les technologies de *Power to X* (et *X to Power*), c'est-à-dire de transformation d'électricité en un autre vecteur énergétique (et vice-versa) permettent de globaliser toutes les échelles de temps avant de différencier les technologies permettant de stocker l'électricité : STEP, stockage d'électricité à air comprimé, gaz, hydrogène...

En 2019, le groupe de travail a choisi de se concentrer sur les modèles de prospective, avec le souci d'éclairer la révision de la PPE en 2022 (pour mise en œuvre en 2023). La modélisation devrait être alors un outil précieux d'aide à la décision, si cet outil est jugé fiable, compréhensible, et digne de confiance. Où en est-on ? Quelles recherches faudra-t-il faire pour y parvenir ? Telles sont les questions qui ont dominé nos travaux.

Ce rapport comporte quatre parties :

- **Les enjeux liés à la prospective énergétique** ainsi que les réponses actuellement apportées par les exercices de modélisation.
- **Les retours d'expérience et les conditions de réussite** des modélisations.
- **Une analyse SWOT des travaux de modélisation** engagés aujourd'hui en France.
- **Une conclusion proposant des points de vigilance et des recommandations** sur les processus de modélisation et les recherches à mener.





1 LA MODÉLISATION PROSPECTIVE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

— COMME OUTIL D'ÉCLAIRAGE STRATÉGIQUE DANS LE CONTEXTE DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

1.1

UN BESOIN DE MODÉLISATION POUR TOUS LES ACTEURS DU SYSTÈME, MAIS DE MANIÈRE DIFFÉRENTE

On observe depuis 2010 une relative stabilité de la consommation électrique française. Cette stabilité résulte notamment d'évolutions contrastées dans différents secteurs industriels, d'amélioration de l'efficacité énergétique et de transferts d'usages (notamment chauffage et eau chaude sanitaire).

En raison de la baisse de la part de la consommation industrielle et de la hausse de celle des particuliers, on assiste à une variabilité croissante de la demande en électricité. De plus, la variabilité de la demande résiduelle² d'électricité devrait augmenter sensiblement à l'avenir, au fur et à mesure que se développent les énergies renouvelables non commandables dans le mix énergétique.

Le développement de la mobilité électrique et d'autres usages (chauffage électrique, chauffe-eau solaire) ainsi que l'autoconsommation pourraient également avoir un impact non négligeable sur le réseau électrique. Ces deux sujets seront évoqués un peu plus loin.

La modélisation prospective est utile à tous les acteurs de la transition énergétique, car tous ont besoin d'anticiper les changements à venir afin de prendre les meilleures décisions de planification, de réglementation, ou d'investissement. Pour les réseaux électriques, cette anticipation s'effectue

à travers la production de scénarios dynamiques d'évolution dans un écosystème énergétique européen multidimensionnel.

Bien que les modélisations prospectives de la transition se caractérisent par la production de scénarios représentant des futurs possibles (et non nécessairement la réalité à venir), et soient inévitablement soumises à des incertitudes, elles peuvent permettre de ne pas réitérer certaines erreurs et d'illustrer les contraintes à satisfaire. Elles peuvent en outre favoriser une meilleure coopération entre acteurs du système électrique (transporteurs, distributeurs, agrégateurs, opérateurs de flexibilité...), et en particulier la collaboration entre opérateurs de réseaux, à travers une mise en commun, une normalisation, et une rationalisation des hypothèses prises en compte dans les modèles.

Cependant, si tous ont besoin de modéliser, chaque acteur a légitimement ses propres objectifs, liés à sa situation, ses ambitions, ses contraintes, et son horizon temporel (qui peut aller du temps réel jusqu'à plusieurs décennies). Cela peut conduire à des hypothèses de travail différentes selon les acteurs :

1. L'État et ses représentations visent la réduction des gaz à effet de serre sur l'ensemble du territoire, mais aussi la montée en puissance des EnR électriques dans un système au mix de production déjà fortement décarboné, et la baisse de la part du nucléaire. A cela s'ajoutent la sécurité d'approvisionnement, la maîtrise du budget climat (alloué à la transition énergétique), la régulation des marchés, les externalités économiques positives espérées de

la transition énergétique (emplois, croissance, balance des paiements) ainsi que l'acceptabilité de la transition auprès de la société civile (réglementation, fiscalité, dépenses énergétiques, incitations...).

2. Les collectivités locales se veulent de plus en plus exemplaires en matière de décarbonation. Elles vont surtout s'intéresser aux ressources locales et aux aspects urbanistiques de la transition énergétique, à ses effets sur le mode de vie, l'habitation, les transports. Elles souhaitent aussi minimiser les coûts d'investissement et de fonctionnement de leurs infrastructures.

3. Les opérateurs régulés de réseaux d'électricité (transport et distribution) ont l'obligation de gérer leurs infrastructures en garantissant l'équilibre offre-demande à tout instant sur le territoire ainsi qu'une bonne continuité de fourniture, en prenant en compte les interactions avec les opérateurs européens (interconnexions pour le réseau de transport). A quoi s'ajoute la planification des investissements à long terme dans un paysage énergétique en profonde mutation, avec l'arrivée de nouveaux acteurs, de nouvelles technologies et leviers d'innovation, et une production de plus en plus décentralisée. Enfin, il leur faut tenir compte du comportement des usagers et de son évolution.

4. Les acteurs industriels privés opérant dans le champ concurrentiel sont, quant à eux, incités à consolider mais aussi à faire évoluer leurs modèles d'affaires. Ils ambitionnent le maintien ou la croissance de leurs parts de marché dans un environnement où l'offre et la demande d'électricité deviennent de plus en plus atomisées (nombre croissant de fournisseurs d'électricité, de fournisseurs de services énergétiques, d'autoconsommateurs) mais où émergent des agrégateurs dont l'action vise à limiter cette atomisation. Leurs critères de modélisation seront guidés par le taux de retour sur investissement. Ces acteurs regroupent à la fois les *utilities* mais également des entreprises d'autres secteurs (mobilité, BTP...).

5. La société civile est évidemment concernée, et les associations correspondantes ont recours à des modélisations qui intègrent la sensibilité des citoyens au coût des solutions à déployer

et à la fiscalité nécessaire à leur mise en œuvre. Les convictions peuvent aussi jouer un grand rôle dans les transformations sociales liées à la transition énergétique (changements radicaux de certains usages énergétiques finaux, limitation des surcoûts énergétiques...). Les résultats des modélisations peuvent en outre permettre de guider les consommateurs dans différents choix : investissements dans les EnR, autoconsommation, choix du fournisseur d'électricité, transition vers la mobilité électrique...

1.2

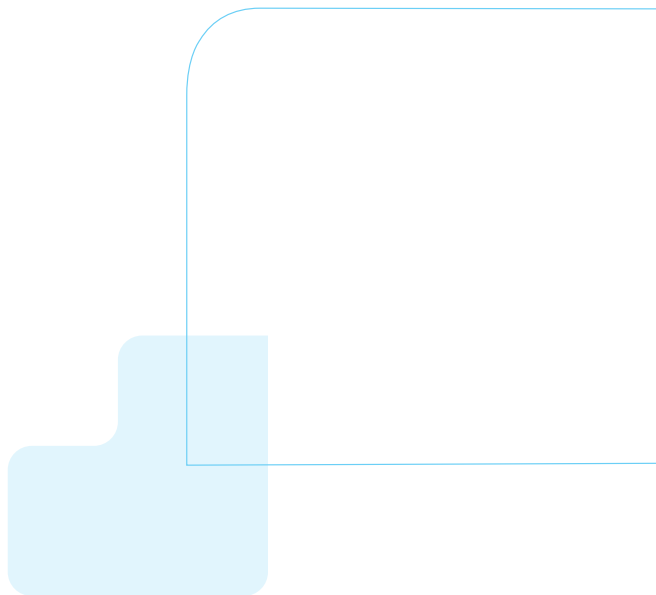
UNE PLURALITÉ DE DIMENSIONS À PRENDRE EN COMPTE

Les exercices de modélisation prospective du système énergétique français ont à prendre en compte plusieurs dimensions :

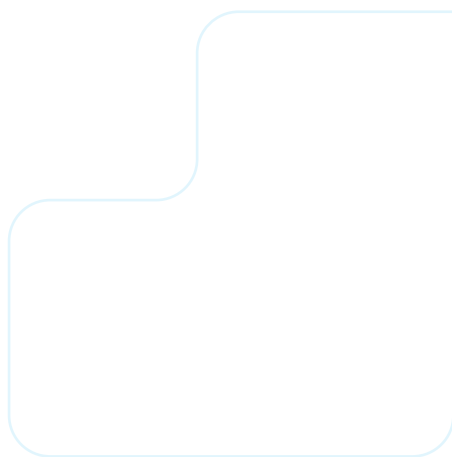
- **Technologique** : capacités installées d'EnR variables, électrification des usages, développement de nouvelles filières (hydrogène, biométhane, combustibles liquides...). Les modèles doivent prendre en compte ces nouvelles technologies à travers des scénarios prospectifs sur plusieurs années, ainsi que les différents mécanismes permettant l'équilibre offre-demande, et plus particulièrement les contraintes techniques de court terme sur les ouvrages.
- **Économique et sociale** : évaluation des coûts de la transition énergétique, mais aussi de ses impacts sur la société, la croissance, les emplois.
- **Géostratégique** : dépendance vis-à-vis de certaines matières premières, compétitivité industrielle, importation de métaux et terres rares.
- **Environnementale** : émissions de gaz à effet de serre, propension à favoriser l'économie circulaire et analyse de cycle de vie des technologies énergétiques...

- **Spatiale** : place des réseaux français d'électricité dans un espace plus large qu'est l'Europe continentale (rôle des interconnexions), tout en prenant en compte les spécificités et l'importance croissante des mailles locales ou hyper-locales dans la transition énergétique (systèmes énergétiques locaux, communautés énergétiques locales ou citoyennes...).

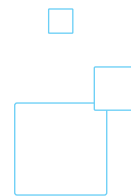
L'ensemble de ces dimensions a pour dénominateur commun l'incertitude. En effet, le nombre d'incertitudes quant aux hypothèses utilisées est croissant et peut justifier la nécessité de se tourner vers des modèles stochastiques plutôt que déterministes⁹.



9- Noter qu'on regroupe ici par simplification sous le terme « d'incertitude » à la fois les facteurs d'incertitude (non probabilisables) et les aléas (phénomènes récurrents auxquels on peut affecter des probabilités). Ces aléas sont en général adressés dans les modèles stochastiques (exemple de la variabilité de la météo à court terme) alors que les incertitudes à long terme sont plutôt traitées par une approche en scénarios/analyse de sensibilité/minmax regret.



2 RETOURS D'EXPÉRIENCES ET CONDITIONS DE RÉUSSITE



2.1

DE LA DIVERSITÉ DES MODÉLISATIONS UTILISÉES POUR LA PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE

Les efforts de modélisation du système énergétique ont débuté dès les années 1950 au niveau européen. L'analyse et l'évaluation des politiques énergétiques ont été au cœur des préoccupations de la Commission européenne dès la mise en place de la Communauté (CECA, puis EURATOM¹⁰), et des collectifs « d'officiers scientifiques » ont joué un rôle essentiel en termes de transfert d'informations entre les décideurs et les modélisateurs en orientant les programmes européens de recherche sur le sujet. Ces programmes ont abouti à la construction d'instruments ayant permis à l'Europe – et à la France – de se doter d'une capacité d'expertise alimentée par :

- Des modèles technologiques de « sciences de l'ingénieur » dès la fin des années 1970 : modèles EFOM (Energy Optimisation Flow Model – modèle déterminant par la programmation linéaire) et MEDEE (modèle d'évolution de la demande d'énergie – industrie et résidentiel tertiaire).
- Des modèles « intégrés » traitant simultanément de l'offre et de la demande d'énergie, et donc des marchés qui vont jouer un rôle d'orientation important par l'intermédiaire des prix : modèles PRIMES (optimisation) et POLES (simulation).
- Par la suite, les modèles ont consisté en de gros projets évolutifs à partir d'une architecture donnée. Ces modèles ont évolué à travers deux dimensions : leur intensité

(approfondissement d'un phénomène économique tel que les externalités négatives ou le progrès technique endogène), et leur extension tirée par l'évolution des politiques énergétiques (intégration des renouvelables, des nouvelles technologies de séquestration du carbone...) ¹¹.

Il existe aujourd'hui, en France et en Europe, un nombre important d'exercices de modélisation prospective du système énergétique. Ces études mettent en jeu une grande diversité de scénarios mais aussi de méthodologies qui ont des objectifs propres et qui pourront donner des résultats différents. On peut ainsi citer, de manière non exhaustive :

- **Des modèles macroéconomiques** permettant d'étudier les relations du système énergétique avec le reste de l'économie, que ce soit du point de vue de l'équilibre partiel (équilibre offre-demande d'un ou plusieurs secteurs) ou de l'équilibre général (étude des conditions permettant un équilibre de toute l'économie).
- **Des modèles économétriques** qui se fondent sur des méthodologies statistiques permettant d'extrapoler des données historiques vers le futur à court ou moyen terme.
- **Des modèles d'optimisation des investissements**, par exemple via la minimisation de leur coût total actualisé, sous contrainte (ex : plafond d'émissions de gaz à effet de serre).
- **Des modèles mathématiques (plus généraux que les modèles d'optimisation des investissements)**, tels que la modélisation de phénomènes physiques sous la forme de fonctions objectives linéarisées à optimiser, soumises à un certain nombre de contraintes linéaires ou non, ou encore des modèles

¹⁰- Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier (1951) et Traité EURATOM pour la Communauté européenne de l'énergie atomique (1957)

¹¹- Zagamé, P. (2008). Modèles de l'énergie et nouvelles théories du progrès technique. Communication au Conseil Français de l'Energie.

de croissance optimale (définition des trajectoires de croissance les plus adéquates).

À la pluralité des méthodologies de modélisation s'ajoutent par ailleurs des approches analytiques différenciées :

- Les modèles de type **top-down**, qui sont caractérisés par leur haut niveau d'agrégation et prennent en considération les différents secteurs de l'économie. Ces modèles rendent généralement plus difficile la prise en compte de ruptures technologiques projetées et l'analyse des impacts sur le système énergétique, mais sont souvent mieux adaptés aux questions macroéconomiques.
- Les modèles de type **bottom-up**, qui décrivent la cohérence technique d'un système énergétique à partir d'une description plus ou moins approfondie des technologies. Ces modèles sont mieux adaptés à l'étude de problèmes systémiques, mais omettent souvent les coûts cachés, les imperfections des marchés, et certaines variables macroéconomiques (effets de levier, effets de prix, PIB, emplois...).

Parmi les réflexions du groupe de travail, quelques grands modèles ont été cités :

- Les modèles qui simulent l'adéquation ou la performance économique de systèmes énergétiques interconnectés aussi bien à court qu'à long terme à la maille européenne (modèle mathématique Antares, utilisé par RTE¹²).
- Ceux qui simulent l'équilibre offre-demande à la maille européenne à un pas de temps horaire en prenant très finement en compte les aléas climatiques, en se basant sur une représentation simplifiée des réseaux électriques, et en anticipant les besoins futurs de flexibilité du système (modèle d'optimisation *Continental*, utilisé par EDF et utilisé en conjonction avec des outils tels qu'*Opium* pour le dimensionnement des besoins de réserve, et *Paladyn* pour simuler le comportement en fréquence du système en cas d'incident réseau).
- Ceux qui tentent de satisfaire la demande d'électricité sous contrainte, à travers une

approche par moindres coûts et en tenant compte de l'impact de décisions politiques et de stratégies carbone et sur un périmètre géographique donné, mais structuré à partir des 15 régions d'analyse de l'OCDE (modèle mathématique MarkAI/TIMES).

- Ceux qui couplent des paramètres intersectoriels tels que la demande d'électricité avec des variables liées aux logements, aux déplacements, au zonage et à l'étalement urbain sur une maille locale afin de réduire les émissions de CO₂ (modèle *Tranus*, appliqué à la planification urbaine stratégique de la ville de Grenoble).
- Ceux qui, en modélisant le système énergétique mondial (évolution de la consommation, de la production et des prix de l'énergie) sur la base des hypothèses exogènes d'évolutions démographiques et économiques, évaluent le coût et l'impact des politiques climatiques variées à horizon 2050 ou 2100 (modèle *POLES*).

2.2

DE L'IMPORTANCE DES HYPOTHÈSES ET DE LEUR TRANSPARENCE POUR RENDRE LES MODÉLISATIONS COHÉRENTES, INTELLIGIBLES, ET EXPLOITABLES

2.2.1 Améliorer la transparence des hypothèses

L'analyse des modélisations prospectives fait ressortir des insuffisances non négligeables. La première concerne **le manque de transparence des hypothèses utilisées en entrée des modèles et des paramètres dans ces modèles**. Cette opacité peut avoir plusieurs raisons :

- la volonté de préserver le modèle d'affaires des entreprises ou des laboratoires de modélisation prospective, dont la valeur ajoutée est en grande partie basée sur le recueil de données relatives au système énergétique et ses mécanismes, et à leur organisation en un modèle ;
- le manque de fiabilité des données d'entrée ou des hypothèses sur leur évolution ; la volonté de préserver un savoir-faire industriel ou une technologie de production (nouveau nucléaire, hydrogène, gaz renouvelable...) ;
- la confidentialité de certains de ces modèles.

Cette opacité rend ainsi les modélisations assimilables à des « *boîtes noires* » dont les hypothèses d'entrée et les paramètres sont mal justifiés, voire non déclarés. Ces *boîtes noires* sont parfois « vendues » par des consultants privés, qui, tout en détaillant certaines hypothèses, peuvent en laisser d'autres incomplètes ou peu explicitées, ce qui rend l'exercice de modélisation inexact, voire biaise fortement les conclusions.

2.2.2 Le besoin de rationalisation et de cohérence des hypothèses

La deuxième difficulté à laquelle se heurtent les exercices de prospective est **la difficulté à faire dialoguer les exercices de prospective entre eux**. La comparaison entre modèles conduit même à observer des résultats qui conduisent en apparence à des conclusions paradoxales.

Du point de vue de l'offre, certaines modélisations se focalisent de manière exclusive sur la production globale d'électricité, ou sur une production à moindre coût avec l'introduction de contraintes environnementales, ou encore sur une production tributaire de l'évolution (ou de la disparition) d'une certaine technologie : nucléaire, hydrogène, renouvelables...

Du côté de la demande, certaines études ont une approche descendante sur l'évolution de la consommation globale par usage final, en partant d'hypothèses de PIB, alors que d'autres auront une approche ascendante partant au contraire de l'évolution concrète des modes de vie générant cette consommation.

Enfin, du côté des impacts étudiés sur les systèmes environnemental, social et économique, certaines études se concentrent sur les émissions de GES alors que d'autres se penchent sur les émissions de pollution locale, ou encore sur le contenu en emplois de la transition énergétique et sur l'évolution des différentes filières technologiques en matière de ressources humaines.

Ces constats posent la question **de la rationalisation et de la pertinence des hypothèses de modélisation (et des données sous-jacentes)** : un même modèle utilisé par deux personnes différentes pourra même donner des résultats

divergents, voire contradictoires. Cette disparité de résultats est liée à des visions très différentes des acteurs sur l'évolution des paramètres (baisse des coûts, prix des énergies, prix du CO₂...) et au contexte (choix politiques et de la société). La rationalisation des hypothèses suppose une concertation et une prise de recul des modélisateurs en amont du processus pour se mettre d'accord sur un ensemble de sujets sur lesquels ils doivent se positionner (ne serait-ce que pour dire que le sujet n'est pas abordé par la modélisation, puis, si le sujet est traité, en expliciter les hypothèses de manière ordonnée et un minimum « standardisée »). Cet effort permettra par la suite de positionner les études les unes par rapport aux autres et fournira aux acteurs du système une vision globale des efforts de modélisation prospective pris de manière collective.

2.2.3 Vers des modèles globalement moins complexes et plus facilement exploitables

Les utilisateurs des modèles se plaignent de leur complexité, qui s'ajoute aux incertitudes que ceux-ci comportent déjà. Au-delà de la production de résultats chiffrés, les modélisations ont vocation à fédérer l'ensemble des acteurs du système. Cela ne pourra se faire que si les porteurs de modèles adoptent un **langage commun et simplifié** permettant la discussion entre toutes les parties prenantes quels que soient leurs domaines de compétence, des décideurs politiques aux citoyens. Une étape serait la constitution en France de groupes d'expertise portant une réflexion sur la fourniture d'éléments de vulgarisation, de guides méthodologiques destinés à la compréhension des modèles, et de grilles de lecture opérationnelles permettant d'analyser et de comparer différents scénarios.

La prise de conscience est assez générale : le projet européen *Open Entrance* ambitionne ainsi de développer une plateforme ouverte de données et de modèles, en vue de constituer une communauté de modélisateurs européens.

2.3

LA NÉCESSITÉ D'UNE MODÉLISATION PROSPECTIVE MULTIDIMENSIONNELLE

La dernière PPE laisse un certain nombre de sujets ouverts quant à la prospective des réseaux : si pour la décennie à venir les infrastructures en place sont suffisantes (pas de mise en contrainte directe), il faudra faire des choix sur les évolutions ultérieures du mix énergétique. Les évaluations ne seront possibles qu'avec des modélisations systémiques, multidimensionnelles. Les travaux du groupe ont particulièrement insisté sur l'importance des hypothèses issues de plusieurs de ces dimensions.

2.3.1 La dimension technique

Elle est indispensable et se réfère aux lois de la physique. Les scénarios à forte part d'EnR variables doivent ainsi prendre en compte la baisse de l'énergie cinétique, et plus généralement compenser la perte de services système que leur implémentation massive provoquerait. Il s'agit d'éviter le risque de défaillance du système à la moindre fluctuation significative. Des solutions à base d'électronique de puissance sont actuellement développées pour compenser la variabilité des EnR.

Les contraintes issues des lois de la physique doivent être complétées par des hypothèses liées à l'architecture des réseaux électriques (choix structurels d'arborescence, de maillage, de niveaux de tension des réseaux futurs), aux propriétés électromécaniques des composants et matériels (alternateurs, électronique de puissance, capteurs), à leur obsolescence, et à la stabilité générale du système (fréquence, tension, réglage angulaire). S'ajoute à cela un couplage avec les hypothèses climatiques à court comme à long terme : certains phénomènes météorologiques peuvent en effet générer des contraintes très ponctuelles (intempéries) ou a contrario avoir des conséquences durables (récurrence de climats extrêmes) sur la stabilité et la résilience du système.

2.3.2 La dimension temporelle

La difficulté est de rendre compatibles les modèles prospectifs (sur plusieurs décennies) et la réalité des opérations à très court terme (infra-journalier, voire de l'ordre de la milliseconde pour le maintien de la fréquence et de la tension). Si les hypothèses techniques¹³ utilisées par les modélisateurs contribuent à cette « réconciliation inter-temporelle », leurs objectifs diffèrent en fonction de la nature de leur métier et des horizons de temps considérés :

- **Le court terme** (de l'infra-journalier à l'année en cours). Pour les producteurs d'électricité, il s'agit d'optimiser les plans de production et la gestion des marges opérationnelles. Pour les opérateurs de réseaux, d'établir les conditions techniques de d'adaptation de l'offre et de la demande, de gérer les crises (réalimentation des clients en cas d'incidents sur le réseau), d'évaluer au plus juste les situations d'utilisation des réseaux par les nouveaux clients à raccorder – qu'ils soient producteurs ou (auto)consommateurs – et d'adapter les infrastructures existantes de façon marginale.
- **Le moyen terme** (de 1 à 5 ans). Pour les producteurs, l'enjeu est l'équilibre du portefeuille offre-demande : anticipation de besoin de fermeture de certaines capacités, calcul des valeurs d'usages possibles pour les centrales... Pour les opérateurs de réseaux, le moyen terme correspond à des plans de développement d'ouvrages, par exemple dans le cadre de schémas régionaux de déploiement des EnR, ou lorsque le développement d'un type d'ouvrage a des conséquences sur le développement d'autres infrastructures (ex : si le développement du réseau de distribution moyenne tension appelle un renforcement du réseau de transport).
- **Le long terme** (au-delà de 5 ans, voire 10 ans pour la modélisation de l'évolution de l'offre, ou même plusieurs décennies pour la durée de vie des actifs conventionnels). La modélisation du long et du très long terme s'intéresse à l'étude des mix énergétiques futurs, à l'évolution des prix de l'énergie

¹³- Et plus particulièrement les invariants de la thermodynamique : énergie cinétique, énergie électromagnétique.

et à la valorisation des actifs (production, stockage, équipements...) dans un paysage incertain et soumis à des transformations mondiales. Pour les opérateurs de réseaux, il s'agit d'établir des ordres de grandeur sur les architectures possibles des infrastructures et leur évolution: localisation des véhicules électriques et des bornes de recharge, principes de normalisation des réseaux futurs...

2.3.3 La dimension spatiale

La décentralisation des moyens de production et l'émergence du « fait local » du point de vue de l'offre comme de la demande (autoconsommation, stockage et mécanismes de flexibilité locale) renforcent la nécessité de décliner et d'adapter les modèles prospectifs à des mailles plus fines. Les exercices de modélisation multi-échelles permettent de mettre en exergue les différences locales en matière de gisements potentiels et de ressources disponibles, de diffusion des technologies, et de caractéristiques économiques et sociales.

Parmi les hypothèses à prendre en compte sont évoquées les variables liées à la dynamique d'urbanisation des territoires (évolution de la population locale et attractivité du territoire, densité urbaine, étalement urbain, coût et accès au logement, coût du foncier, caractéristiques du bâti), à l'équilibre du marché local de l'emploi, à l'émergence de mobilités propres et de nouveaux modes de transport (croissance des véhicules électriques et localisation des bornes de recharge, autopartage), au tissu économique local (localisation des entreprises industrielles ou tertiaires), et au climat (ensoleillement, vent, température). Quand bien même l'équilibre offre-demande d'électricité au niveau national resterait stable, les évolutions locales de l'offre et de la demande risquent de créer des déséquilibres entre mailles locales qui devront être prises en compte par les opérateurs de réseaux afin de maintenir la stabilité du système.

L'importance croissante de la maille locale ne remet pour autant pas en question la nécessité de modéliser le système électrique européen dans son ensemble : l'Europe est une

plaque électrique interconnectée permettant de garantir, en cas de déséquilibre ponctuel, une sécurité d'approvisionnement. Des modèles de simulation à la maille européenne (modélisation des oscillations de fréquences interzones, modélisation *end-to-end*¹⁴ du système européen...) sont ainsi indispensables à la prospective des réseaux pour éviter les surinvestissements et pour optimiser le pilotage du système. Par conséquent, l'articulation d'une vision locale avec une vision nationale et européenne et le couplage spatial des modèles prenant en compte les services systèmes qui sont associés à cette vision semblent être deux conditions de réussite essentielles.

2.3.4 La dimension microéconomique

Les modélisations prospectives des réseaux électriques font intervenir l'optimisation des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance, auxquels peuvent s'ajouter des coûts de fin de vie (démantèlement de centrales, recyclage de batteries). Pour les opérateurs de réseaux, en particulier, ces modélisations permettent de décider de la faisabilité des investissements en tenant compte :

- **De l'évolution de l'offre et de la demande d'électricité** sur le territoire à un horizon moyen et long terme.
- **Du taux de pénétration de nouvelles technologies** dans le secteur de l'énergie ou dans des secteurs connexes (ex : mobilité, bâtiment) et des **possibilités de valorisation** associées à des technologies ou à ces nouveaux usages : EnR variables, *power-to-gas*, hydrogène, *vehicles-to-grid*, batteries, flexibilités locales...
- **Des capacités supportées par les interconnexions gérées par les réseaux de transport.**
- **Des enjeux économiques associés aux marchés de l'électricité en Europe** : signaux de prix, *market design*, *market coupling*¹⁵...

14- Traduction en français : « *modélisation de bout en bout* » (ex : d'un point du réseau électrique à un autre).

15- Respectivement traduits en français par « *architectures de marchés* » et « *couplage de marchés* ».

Une des hypothèses microéconomiques structurantes dans les modèles est le **taux d'actualisation des coûts totaux**. Il s'agit d'un paramètre très sensible et dont les variations peuvent aboutir à des décisions très différentes en matière d'investissement.

2.3.5 La dimension macroéconomique

Au-delà de la question des coûts directs se pose celle des effets sur l'économie. Ces aspects sont pris en compte dans les modèles d'équilibre partiel et général qui simulent les chocs exercés sur l'économie par certaines variables utilisées dans les mécanismes de marché (fiscalité carbone, instruments réglementaires, évolution des prix de l'énergie), et par d'autres variables propres au système énergétique (consommation, intensité énergétique, émissions de gaz à effet de serre). Selon les hypothèses retenues pour ces variables, les modèles attribueront par exemple la réduction des émissions de carbone à la baisse de l'intensité énergétique, alors que pour d'autres ce sera l'effet d'un changement d'énergie. Certains modèles pourront également tenir compte des deux facteurs simultanément.

Bien que ce ne soit pas le cas pour la plupart des modèles macroéconomiques aujourd'hui, l'étude des effets macroéconomiques pourrait néanmoins permettre aux modélisations de rendre compte de **la déformation de la structure industrielle de certains secteurs**¹⁶ (délocalisation des industries européennes de l'automobile ou du stockage vers des concurrents asiatiques), ou encore de la **fluidité du marché du travail** en fonction des secteurs (impact sur le niveau des salaires et répercussions sur la croissance du PIB).

L'étude des mécanismes de **réinjection dans l'économie du produit des taxes** prélevées sur l'énergie et son utilisation (ex : taxe carbone) permet d'estimer ses effets à travers une offre nouvelle de biens et services, par exemple des aides à l'investissement pour les entreprises ou une stimulation de la demande des ménages. Elle offre en outre à l'État l'option de redistribuer partiellement ces taxes auprès des ménages les plus précaires afin de ne pas accroître

le poids de leurs dépenses énergétiques. Il faut cependant noter qu'il est en pratique impossible d'obtenir une modélisation macroéconomique satisfaisante sur des phénomènes économiques complexes se déroulant sur des dizaines d'années ; l'évaluation des effets macroéconomiques des politiques carbone ou des politiques énergie-climat bute irrémédiablement sur cette difficulté.

2.3.6 La dimension politique et réglementaire

Les marchés européens de l'électricité ont subi de profondes mutations depuis la libéralisation des marchés qui a débuté à la fin des années 1990. Auparavant, les systèmes étaient le plus souvent des monopoles intégrés et régulés sur l'ensemble de leur chaîne de valeur (production, acheminement, fourniture). Les méthodologies utilisées à l'époque étaient fondées sur une **planification centralisée visant à satisfaire les besoins de la collectivité**. Aujourd'hui, les rôles et responsabilités ainsi que les décisions afférentes sont répartis entre différents acteurs. Ceux-ci, pour les besoins de leur activité, sont appelés à développer des modélisations intégrant les décisions prises par l'ensemble des acteurs. Les opérateurs de réseaux ne font pas exception : pour planifier le développement des infrastructures de réseaux (transport et distribution) – qui en France sont restées soumises à des obligations de service public – ces opérateurs sont amenés à anticiper les décisions des acteurs du secteur dérégulé tout en intégrant des décisions relatives à leurs activités intrinsèques (renforcement d'ouvrages par exemple). Un grand nombre d'acteurs prennent une place dans le système électrique (agrégateurs, *prosumers*¹⁷, pilotes énergétiques locaux...), et réalisent des échanges physiques et financiers sur le marché ou entre eux (exemple des communautés énergétiques locales).

Les modèles utilisés pour la prospective des réseaux supposent souvent des marchés en concurrence parfaite, une demande inélastique, des biens homogènes, ainsi qu'une incertitude relativement maîtrisée. Les règles du marché sont en réalité imparfaites, et soumises aux

16- Noter que la plupart des modèles qui rendraient compte de cette hypothèse (déformation de la structure industrielle) sont d'une nature autre que les modèles centrés sur le secteur de l'énergie, même s'ils intègrent des composantes macroéconomiques. La politique industrielle nationale dépend d'autres paramètres (valeur ajoutée des entreprises, présence d'avantages concurrentiels...).

17- Terme anglais fréquemment utilisé pour désigner tout type de consommateur également producteur de tout ou une partie des biens qu'il consomme. Dans le secteur de l'électricité, un *prosumer* peut être producteur mais également autoconsommateur qui consomme l'électricité qu'il produit sur un seul site ou sur des sites diffus.

effets de solutions innovantes portées par les évolutions technologiques (autoconsommation, batteries, blockchain...). Des distorsions peuvent être provoquées par des incitations externes (normes, instruments réglementaires, fiscalité), qui envoient des signaux influençant le comportement des acteurs. Un exemple récent est celui des subventions aux EnR¹⁸.

2.3.7 La dimension climatique

L'accroissement de l'amplitude et de la fréquence d'épisodes extrêmes fait ressortir le climat comme un paramètre essentiel à intégrer dans les modélisations : composantes du système climatique (atmosphère, océans, cryosphère, hydrosphère, biosphère) ; variables météorologiques (ensoleillement, nébulosité, températures, hygrométrie, vent...) ; modification des valeurs de ces variables par rapport aux références historiques sur un territoire donné¹⁹.

Les modélisateurs cherchent à constituer des plateformes de modèles climatiques ainsi que des bibliothèques d'aléas potentiels générés par les climats futurs (jusqu'à plusieurs centaines de scénarios climatiques). La difficulté est de modéliser des scénarios climatiques dont la variabilité spatiale et temporelle est élevée, en particulier les scénarios extrêmes qui vont définir les critères d'adaptation et de dimensionnement des infrastructures, compte tenu de la disponibilité des EnR (hydraulique compris). Il s'agit de prévoir l'impact du climat non seulement sur la résilience et la sécurité du système électrique, mais aussi sur la qualité de vie et le comportement des populations (migrations potentielles vers d'autres territoires au climat plus propice). Ceci est d'autant plus vrai que l'hypothèse de stationnarité du climat est aujourd'hui remise en cause : il est très difficile de positionner un événement dans un climat en perpétuel changement, et d'extrapoler la fréquence d'un événement rare à partir d'un échantillon temporel limité : moins les modélisateurs auront d'années dans leurs séries temporelles, et plus il sera compliqué de déterminer une probabilité de récurrence de cet événement rare.

Deux approches sont plus particulièrement

utilisées pour modéliser le climat futur et ses impacts :

- **L'approche multi-modèles « mono-trajectoire »**, actuellement préconisée par le GIEC²⁰. Elle présente cependant des limites telles que la non-cohérence des situations entre les différents modèles, la difficulté de « recalage » des différents jeux de données d'un modèle à l'autre, ou encore le problème du choix d'une année pivot (2000, 2025, 2050...).
- **L'approche mono-modèle gros échantillon**, permettant d'étudier la variabilité du système climatique sans évolution des forçages externes d'origine naturelle (activité volcanique, variations de l'activité solaire, de l'orbite terrestre) ou anthropique (émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols sulfatés...).

2.3.8 La dimension multi-vecteurs et multisectorielle

Si la sécurité de fonctionnement du système électrique dépend fondamentalement des lois de l'électromagnétisme, la modélisation des réseaux ne peut se faire sans une approche systémique qui combine :

- La prise en compte des **autres vecteurs énergétiques** et des infrastructures qui leur sont associées : réseaux de gaz, chaleur/froid, hydrogène...
- La prise en compte des **nouveaux usages de l'électricité**, eux-mêmes liés aux évolutions technologiques ainsi qu'aux évolutions des modes de vie et des comportements des consommateurs : électrification des usages (notamment l'électromobilité), stockage, autoconsommation individuelle et collective...

Cette approche plus globale met en lumière les influences intersectorielles déjà évoquées, ainsi que l'importance de la concurrence technologique : l'accélération d'une technologie due au progrès technique et à la baisse des coûts peut déclencher des réactions en chaîne sur d'autres marchés. Un exemple est celui du stockage de

18- La production d'électricité renouvelable a été soutenue depuis le début des années 2000 par des obligations d'achat de l'énergie produite, à un tarif d'achat supérieur aux prix de marché, et fixé sur 15 à 20 ans. Ces obligations d'achat sont proposées à guichet ouvert, ou à l'issue d'appels d'offres, selon les filières et les seuils de puissance.

19- La dimension climatique renvoie à deux constantes de temps distinctes : (1) l'inertie climatique de long terme liée aux émissions de CO₂ et pour lesquelles les politiques climatiques dont celles de l'énergie ont vocation à répondre sur le long terme (concept de neutralité carbone) ; (2) l'impact du changement climatique à moyen terme, observé sur les actifs de domestication de l'énergie (perte d'exploitation due aux aléas météorologiques, montée des eaux...) par rapport à une croissance des usages (ex : climatisation).

20- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

l'énergie via les batteries : la baisse du coût des batteries combinée à l'augmentation de leur densité énergétique favorisera le développement des véhicules électriques et du *vehicle-to-grid*, qui auront eux-mêmes un impact sur les réseaux d'électricité où transiteront un plus grand nombre de flux bidirectionnels. La croissance du marché des batteries aura des conséquences non négligeables sur le dimensionnement des infrastructures électriques, et donc sur les choix d'investissements des opérateurs de réseaux.

En outre, la dernière PPE n'a que très peu traité l'interaction entre les différents vecteurs. Indépendamment du niveau de maturité du sujet dans la législation, les collectivités locales doivent réfléchir à un développement coordonné des réseaux d'énergie (électricité, gaz, chaleur/froid) dans le cadre de leurs plans climat-air-énergie territorial (PCAET), et peu d'acteurs sont aujourd'hui capables de les accompagner. La réflexion sur le multi-vecteur sera sans doute stimulée par les projets de transition énergétique des métropoles qui ont récupéré la compétence énergie et réseaux. Cela souligne l'importance d'une modélisation allant au-delà de la simple considération des réseaux électriques dans le système.

2.3.9 La dimension humaine et sociale (SHS)

La politique européenne en matière énergétique met le « **nouveau consommateur** » au centre d'un système électrique décentralisé et intelligent. Ce consommateur a le pouvoir de consommer de l'électricité depuis le réseau, mais également d'en produire pour la réinjecter sur le réseau, voire d'échanger cette électricité avec ses voisins. Ce nouveau rôle joué par le consommateur, qui devient selon les cas *prosumer*, voire *flexumer*²¹, est complexe à représenter dans les modèles, d'autant plus que la protection des données – notamment sur les questions de vie privée et de cyber-sécurité – sera un enjeu d'envergure.

Le rôle du consommateur est renforcé par la question de **l'acceptabilité sociale de la transition énergétique**. Les sciences humaines

et sociales injectent dans les modélisations des hypothèses qu'il est aujourd'hui impossible d'ignorer, mais qui restent difficiles à quantifier :

- Préférences des consommateurs.
- Propension des citoyens à accepter une nouvelle technologie ou ses effets à moyen terme sur l'environnement (concept du « *Not in my backyard*²² »).
- Valeur accordée à des politiques énergétiques nationales ou locales par les citoyens selon leurs profils (catégorie sociale d'appartenance, sensibilité aux problématiques écologiques, localisation géographique) et selon les spécificités de leur territoire (poids des lobbys et des décisions politiques).

Cette acceptabilité traduit **le soutien social** des citoyens aux stratégies de transition, par exemple vis-à-vis d'une technologie donnée. La prévoir est nécessaire à la prospective des réseaux électriques.

Enfin, il faut souligner l'importance croissante des transformations sociétales dans les modélisations, notamment celles qui ont trait à **l'évolution des comportements et des modes de vie**, et qui peuvent concerner des échéances de court comme de long terme. L'omniprésence du numérique et son poids croissant dans les émissions de gaz à effet de serre²³, les possibilités de pilotage des équipements électriques via la domotique et l'Internet des objets (IoT²⁴), les nouvelles formes de mobilité (autopartage, covoiturage), l'émergence de solutions communautaires locales visant à promouvoir une consommation décarbonée (opérations d'autoconsommation collective) sont autant d'éléments à prendre en compte dans les modèles prospectifs.

21- Consommateur d'électricité, selon les cas également producteur de tout ou partie de sa consommation, et contribuant à offrir des flexibilités pour le système électrique, par exemple à travers un pilotage intelligent de ses équipements, électriques.

22- Littéralement « Pas dans mon arrière-cour ». Expression qui désigne l'opposition de certains citoyens à un projet local d'intérêt général dont ils considèrent qu'ils subiront des externalités négatives sous forme de nuisances.

23- 25% des émissions de gaz à effet de serre sont dues aux data centers, 28% aux infrastructures réseau, et 47% aux équipements des consommateurs (ordinateurs, smartphones, tablettes, objets connectés, GPS). Source : ADEME, La Face cachée du numérique.

24- Sigle anglais de Internet of things.

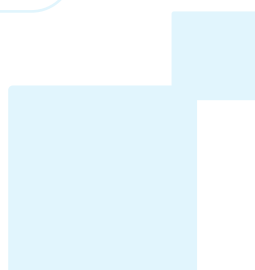
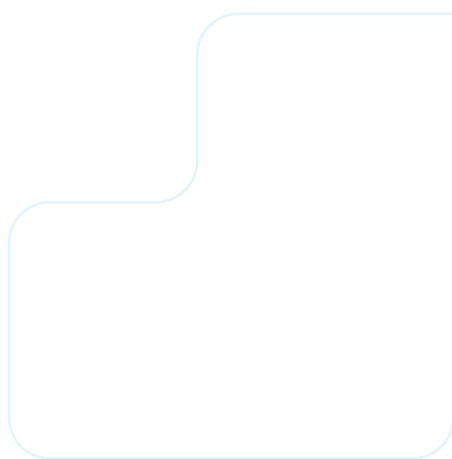
2.4

LES DÉFIS POSÉS PAR UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DES MODÉLISATIONS

L'adoption d'une approche systémique dans les modélisations, et plus particulièrement dans la recherche d'un optimum (en termes de coûts, de consommations finales, d'émissions de gaz à effet de serre...) ne se résume pas à assembler les optima des sous-systèmes composant le système global, ou à juxtaposer des modèles partiels qui ne prendraient en compte que quelques-uns des sous-systèmes. En effet, l'optimisation de chacun des sous-systèmes (électrique, gazier, usages énergétiques finaux) n'a un sens que si ces sous-systèmes interagissent entre eux et si les modélisateurs prennent en compte les fonctions transverses qui sont distribuées sur ces sous-systèmes. Un exemple de fonction transverse dans le système électrique est celui du maintien de la fréquence à la valeur cible de 50 Hz qui concerne l'ensemble des composants du système: production, transport, distribution, usages.

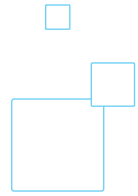
Une modélisation systémique a une vision plus large, mais aussi plus abstraite, moins détaillée, plus floue que celle de modèles plus spécialisés. Ceux-ci peuvent se focaliser sur des « briques » précises²⁵, fondées sur des relations déterminées. Exemple : le coût de l'hydrogène produit par électrolyse. Dans quelle mesure ces briques peuvent-elles être utilisées dans la construction de plusieurs modèles, et in fine dans des modélisations systémiques ? Il s'agit d'une question importante pour le développement de la modélisation, pour la mise en commun d'un maximum de travaux, et pour une plus grande confiance dans les résultats.

25- Les « briques » représentent, selon les cas, des « maillons » du système énergétique: vecteurs énergétiques (électricité, gaz, chaleur, hydrogène), technologies de production (nucléaire, thermique, renouvelable), usages finaux de l'énergie (véhicules électriques, usages domestiques), dimensions particulières (géopolitique des marchés énergétiques européens)...



3

ANALYSE SWOT : PROPOSITION D'UN DIAGNOSTIC STRATÉGIQUE DES PROCESSUS DE MODÉLISATIONS PROSPECTIVES ENGAGÉS EN FRANCE ET EN EUROPE



3.1

FORCES

- **Le savoir-faire français de longue date dans les systèmes énergétiques :** grandes entreprises, grandes écoles et universités (laboratoires et chaires portant sur les systèmes énergétiques), instituts spécialisés dans la recherche sur l'énergie, l'environnement et le climat...
- **La pluralité des équipes dédiées à la modélisation prospective du système énergétique.** On en trouve chez toutes les parties prenantes concernées (État et pouvoirs publics, collectivités territoriales, opérateurs de réseaux, régulateur, entreprises...), et ces équipes regroupent de plus en plus des disciplines: ingénieurs, économistes, chercheurs en SHS, climatologues...
- **La convergence des acteurs vers la nécessité d'une approche systémique des modélisations.** Ils constatent tous l'impossibilité de modéliser les réseaux d'électricité de demain sans prendre en compte les interactions avec d'autres vecteurs et usages.

3.2

FAIBLESSES

- **Un manque de consensus et de transparence sur les hypothèses utilisées dans les modélisations, et donc de confiance pour les utilisateurs.** Malgré la volonté unanime de modéliser un système énergétique décarboné visant à limiter le réchauffement climatique à moyen et long terme, les attentes des acteurs quant aux résultats des modèles

sont différentes du fait de leur fonction ou de leur cœur de métier. Les stratégies de modélisation vont donc différer sur le choix des hypothèses utilisées et sur les arguments avancés pour justifier et crédibiliser celles-ci. À cela s'ajoute un manque de transparence sur ces hypothèses qui va générer de l'ambiguïté, de l'incertitude supplémentaire, et globalement un manque de confiance dans les résultats.

- **La mise en œuvre d'une approche systémique dans la modélisation des réseaux électriques demeure très complexe.** En effet, une approche intégrative qui fait interagir le système électrique avec d'autres vecteurs et d'autres secteurs de l'économie, et qui sera plus généralement susceptible de traiter de tous les sujets (équilibre du réseau, évolutions offre-demande de court et long terme, créations d'emplois du secteur, politiques industrielles...) permettra une vision d'ensemble, mais sera nécessairement moins détaillée qu'une approche individualisée par briques ou sous-systèmes. La question de connaître le « niveau d'assemblage » le plus pertinent d'un modèle systémique, qui ne transigerait ni sur sa rigueur méthodologique ni sur la transparence de ses hypothèses, reste ouverte et complexe à appréhender.
- **Le poids encore relativement faible des dimensions macroéconomiques et sociales (SHS) dans les modélisations des systèmes énergétiques.** Si ces dimensions ne sont pas négligées dans beaucoup de modèles, elles sont plus difficiles à formaliser et donc plus complexes à modéliser. De ce fait, elles font rarement l'objet d'hypothèses structurantes et apparaissent plutôt reléguées au second plan comme « variables d'ajustement », au profit de dimensions plus techniques. Ceci peut générer des biais à long terme sur

les résultats des modèles, étant donné les évolutions rapides des modes de vie, des comportements sociaux, et la problématique d'acceptabilité de la transition énergétique.

3.3

OPPORTUNITÉS

- **Le nombre important d'initiatives de modélisations de la transition énergétique en France et en Europe, élaborées par les acteurs dans un souci de rationalisation du débat :** pouvoirs publics, recherche, entreprises, think tanks, ONG... Cette diversité devrait permettre aux modélisateurs de confronter leurs hypothèses et leurs méthodologies et de consolider leurs travaux.
- **La volonté de certains acteurs de mettre en commun ce qui peut l'être.** Un mouvement est en cours pour « ouvrir la boîte noire » des modèles, partager des hypothèses, ou encore diffuser des modèles en open source. L'objectif est d'économiser du travail et d'améliorer les résultats.
- **Des pouvoirs publics sensibles aux questions énergétiques et écologiques.** La lutte contre le réchauffement climatique devient une orientation prioritaire. Les décideurs sont demandeurs d'outils d'aide à la décision. Les modélisateurs ont un rôle important à jouer.

3.4.

MENACES

- **La méfiance des décideurs à l'égard de la modélisation.** Elle trouve son origine dans la multiplication des modèles, la non-déclaration des hypothèses, l'opacité des traitements (boîte noire), et in fine la divergence des résultats.
- **« L'infantilisation » du débat sur la lutte contre le changement climatique.** Certains acteurs (lobbys, ONG...) voudraient résumer la transition énergétique à des arbitrages draconiens, tels que le remplacement autoritaire d'une source d'énergie par une

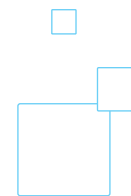
autre afin d'atteindre la neutralité carbone. En réalité, la transition énergétique renvoie à des problématiques multiples (décarbonation du bouquet, décarbonation des usages, meilleure efficacité énergétique...) et demandera le plus souvent du temps. A l'inverse, certains opérateurs auront tendance à ne pas mettre en œuvre les conséquences de la transition énergétique²⁶. Le rapport récent du Haut Conseil pour le Climat souligne ainsi que la baisse de la consommation des hydrocarbures est bien trop faible par rapport à ce qu'elle devrait être²⁷. Cette attitude conduit alors logiquement le politique à adopter des objectifs plus contraignants et plus « ambitieux ».

- **La conjoncture économique et sociale.** Les intérêts à court terme de certaines parties prenantes peuvent fortement différer de l'intérêt public à long terme. Cette divergence peut générer des chocs économiques et sociaux qui pourront eux-mêmes créer des inflexions brusques sur les trajectoires de transition énergétique (cf. l'exemple récent des gilets jaunes).

26- Projet de loi actuel sur l'énergie et le climat (juillet 2019). Voir détails dans l'annexe qui suit ce rapport (éléments de contexte et de cadrage).

27- Premier rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat (juin 2019) : « La consommation primaire de pétrole a diminué de 7,0% entre 2012 et 2018, contre une baisse attendue de 15,6% ; la consommation primaire de gaz naturel a, quant à elle, augmenté de 1,2% entre 2012 et 2018, contre une baisse attendue de 8,4% ».

4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS



La modélisation systémique fait intervenir des problématiques de nature différente mais qui sont complémentaires : prospective des réseaux électriques, de leur architecture, et de leur fonctionnement ; interactions entre les réseaux électriques et les autres réseaux d'énergie français et européens ; implications économiques, sociales, financières, et géopolitiques ; et, par-dessus tout, l'objectif global de neutralité carbone à l'horizon 2050. C'est pour toutes ces raisons que la modélisation systémique est un outil indispensable d'aide à la décision.

Ceci est particulièrement vrai pour les pouvoirs publics, l'État, les collectivités locales, l'Union européenne. Leurs décisions continuent de tracer le cadre général de l'action, en dépit de la montée des intérêts privés. Quel mix énergétique, quelle fiscalité, quelles incitations, quelles normes, quels engagements internationaux, quel calendrier ?

La prochaine échéance est celle de la révision de la PPE 2023-2028. Les pouvoirs publics auront besoin de modélisations fiables et compréhensibles.

La première difficulté est de modéliser le système d'énergie électrique en tenant compte de toutes les variables qui peuvent l'influencer. Leur nombre, la difficulté de quantifier celles qui décrivent des situations et des comportements, la rapidité de l'évolution technologique, l'étendue des incertitudes quant aux valeurs, l'éventualité de perturbations géopolitiques sont autant d'obstacles. Cette difficulté est encore plus forte lorsque les modèles font intervenir des variables liées à des phénomènes économiques complexes qui se déroulent sur des temporalités longues (évaluation des effets macroéconomiques des politiques carbone, des politiques énergie-climat...), et qui peuvent conduire certains

modélisateurs à utiliser de manière excessive des abstractions éloignées des réalités techniques ou économiques.

Cependant, nos débats ont montré que l'on pouvait espérer constituer des outils maniables et fiables, à condition de prendre des dispositions de cadrage et de rendre plus solides les méthodes de modélisation et le contenu des modèles. Cela relève en grande partie de la recherche. Le défi est international, et la coopération entre équipes de pays différents - en Europe d'abord - sera plus qu'utile.

Si l'on retient l'échéance de la programmation 2023-2028, il y a urgence. Les recherches sur la modélisation systémique méritent une haute priorité dans la SNRE. De quelle façon pratique ? Compte-tenu de ce qui a été exposé dans ce rapport, le groupe préconise les axes suivants :

1. Améliorer la transparence et la cohérence des hypothèses et des grandeurs d'entrée utilisées dans les modèles. Les résultats peuvent être très sensibles aux variables d'entrée. Un effort de transparence et de rigueur doit être réalisé sur les hypothèses utilisées. Ce n'est pas qu'une simple affaire de rigueur. Les identifier, puis les rédiger de façon opératoire implique une appréciation interactive de leurs effets. Ainsi, les modèles pourront être plus intelligibles et exploitables et auront vocation à injecter plus de rationalité dans le débat sur la transition énergétique.

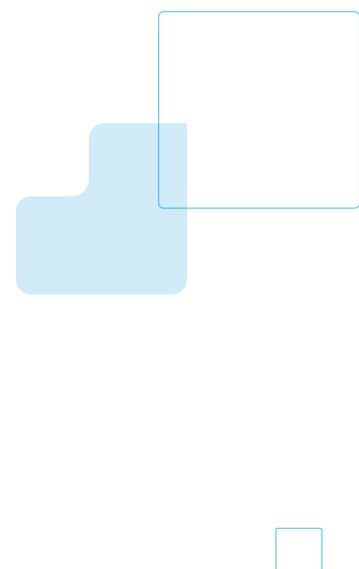
2. Quantifier autant que possible la sensibilité des résultats aux variations de ces grandeurs d'entrée et aux incertitudes associées. Cette condition, mise en œuvre par les différents tests de sensibilité à des paramètres-clés du modèle, est essentielle et permettra d'estimer la plus ou moins grande importance de telle ou telle

grandeur, et donc le travail qu'il convient de lui consacrer. C'est un moyen de voir un peu plus clair dans la forêt des paramètres.

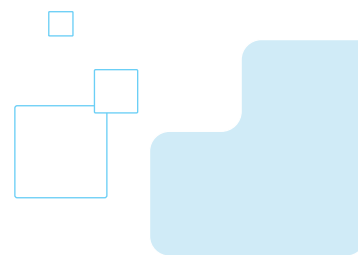
3. Bien intégrer les dimensions suivantes, négligées par beaucoup de modèles :

- **La dimension macroéconomique** : impacts de la transition énergétique sur la croissance, le marché de l'emploi, la balance des paiements...
- **La dimension multi-vecteur et multisectorielle** : interdépendance croissante entre les secteurs de l'électricité et des autres vecteurs énergétiques (gaz, chaleur, froid), mais également d'autres secteurs de l'économie (batteries, véhicule électrique, BTP...).
- **La dimension climatique** : prise en compte plus fine, d'une part, de l'évolution du climat et plus particulièrement des épisodes climatiques extrêmes sur le système énergétique ; d'autre part, de l'effet des choix techniques et politiques sur le système climatique (atmosphère, océans, biosphère...).
- **La dimension humaine et sociale** : évolution des modes de vie et des comportements sociaux (mobilité propre, économie du partage) ; acceptabilité par les citoyens des sources d'énergie utilisées pour lutter contre le réchauffement climatique, et des effets de la fiscalité et de la redistribution sur leur pouvoir d'achat.
- **La dimension faisabilité technique et résilience des systèmes** : l'hybridation des réseaux avec le développement du courant continu, et la stabilité des systèmes avec le développement massif de l'électronique de puissance, nécessitent de faire évoluer les conditions de stabilité des systèmes électriques. Il faut faire apparaître autant que possible une structuration des modèles en « briques » d'usage commun. Cela favorisera les coopérations et économisera les efforts. Cela donnera aussi plus de confiance dans les résultats, car les briques les plus utilisées progresseront vers plus de sûreté.

4. Dans tous ces efforts, mettre en commun ce qui peut l'être. La possibilité de déployer le partage d'informations, de méthodologies, et de connaissances permettra d'aboutir à un socle de « bonnes pratiques » en matière de modélisation. Il faut également faire passer les messages français au niveau européen, alors que des communautés de modélisateurs semblent vouloir mutualiser leurs réflexions. Dans un premier temps, la mise en commun pourra se faire au niveau français. Le fait que les pouvoirs publics aient à prendre des décisions importantes et soient particulièrement concernés par les résultats de modélisations est un facteur favorable. Les intérêts privés suivront, dans les limites résultant de la concurrence. La commande publique, exprimée en partie à travers les priorités de la SNRE, devrait aider à organiser ce travail commun. Le projet de consortium que nous ont exposé RTE, GRT gaz, l'ADEME et le CEA pourrait amorcer une base nationale. Il pourrait ensuite élargir son périmètre à d'autres partenaires. Son ambition première serait de contribuer à l'éclairage des décisions publiques, à commencer par la révision de la PPE 2023-2028.



ANNEXES : ÉLÉMENTS DE CONTEXTE ET DE CADRAGE



ENJEUX DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

La transition énergétique est engagée en France et dans de nombreux pays européens. Si l'Accord de Paris sur le climat préconise de contenir d'ici 2100 le réchauffement climatique en dessous de +2°C par rapport aux niveaux préindustriels, avec un objectif de poursuivre les efforts pour limiter cette hausse à +1,5°C, l'Union Européenne s'est, quant à elle, fixée des objectifs ambitieux dès 2030. Le paquet Énergie-Climat (initié en janvier 2014 et actualisé depuis en termes d'objectifs) vise une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40% par rapport aux niveaux de 1990, une part d'énergies renouvelables à 32% de la consommation énergétique, et une amélioration de l'efficacité énergétique d'au moins 32,5% par rapport à la tendance actuelle²⁸.

En France, la loi TECV de juillet 2015 définit des cibles d'évolution du mix de production, de maîtrise de la consommation, et de transferts d'usages vers l'électricité afin de décarboner cette consommation. En 2030, les EnR devraient ainsi représenter 40% de la production d'électricité sur le territoire national. S'ajoutent à cette législation des orientations complémentaires à moyen et long terme définies par :

- **La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)**, qui préconise une neutralité carbone sur le territoire national en France dès 2050, ainsi que des plafonds d'émissions de gaz à effet de serre à travers des budgets-carbone quinquennaux.

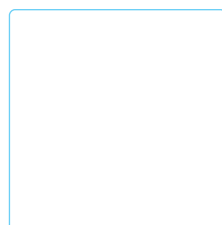
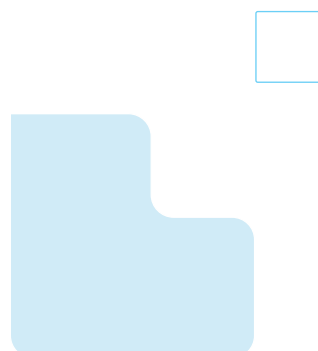
- **La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE)**, qui décline des priorités d'actions concrètes et chiffrées des Pouvoirs Publics sur une durée de dix ans, avec révision possible de la trajectoire envisagée au bout de cinq ans.
- **Le Projet de loi relatif à l'énergie et au climat** en cours, qui envisage pour la France la neutralité carbone à l'horizon 2050 et une réduction de 40 % (au lieu de 30 % dans la loi sur la transition énergétique relative à la croissance verte) de la consommation primaire des hydrocarbures entre 2012 et 2030.

PRÉVISION ET PROSPECTIVE : DEUX DÉMARCHES COMPLÉMENTAIRES

- **La prévision** consiste en **une extrapolation des tendances et mécanismes du présent**. La prévision ne peut être que de **court terme**, car elle repose sur une variation limitée des données d'entrée utilisées sur la période de référence.
- **La prospective** consiste en **un travail exploratoire sur le champ des futurs possibles**, en construisant des scénarios qui combinent les hypothèses sélectionnées par les modélisateurs selon un état donné de l'avenir. La prospective permet aux modélisateurs et aux décideurs de sélectionner non seulement une direction, mais également la manière de s'orienter vers cette direction.

Si ces deux approches sont complémentaires, la prospective reste à manipuler avec précaution. Il faut en effet faire attention à ne pas prendre les scénarios pour des prédictions à court terme. L'incertitude croît avec les années et affecte la fiabilité des scénarios, même si ceux-ci peuvent, dans une certaine mesure, en rendre compte. La prospective cherche ainsi à obtenir un panorama des stratégies de « minimisation des regrets » a posteriori quant aux choix effectués par les modélisateurs²⁹. On retiendra que la prospective peut avoir trois buts (Posnic, Maizi et al., 2011)³⁰ :

- **L'exploration**, permettant de parcourir l'éventail le plus large de futurs possibles, afin d'identifier les risques et leur ampleur.
- **La prescription**, se concentrant sur les futurs les plus probables une fois les risques identifiés, ainsi que les moyens de réponse à ces futurs. L'idée est de mesurer les impacts d'une intervention exogène (politique publique, législation...) sur le reste du système, et de définir la stratégie optimale pour préparer le futur à venir.
- **La rétropolation ou *backcasting***, où le futur est un élément prédéterminé et où le prospectiviste tente de faire apparaître la meilleure trajectoire possible entre le présent et ce futur afin de démontrer la faisabilité « efficiente » (à moindre coût et effort) de ce futur.

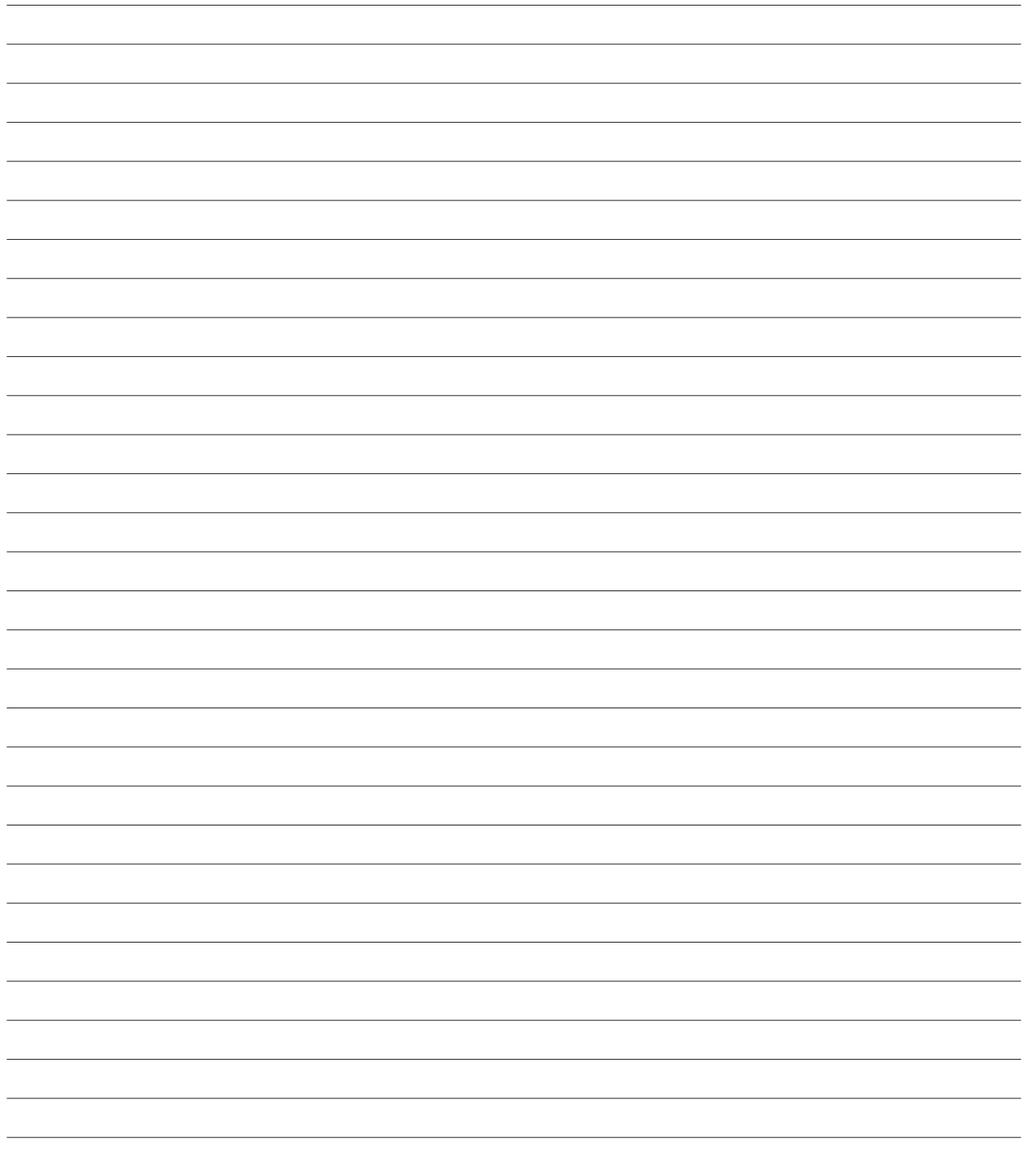


29- Approche « minmax regrets » tirée de la théorie des jeux, et qui conduit au modélisateur à regretter le moins possible ses choix dans le pire des scénarios.
30- Définitions, concepts et méthodologies plus approfondis dans le complément au rapport de thèse professionnelle de S.Postic, « Les différents modèles de prospective énergétique – Guide méthodologique », Schneider Electric et CMA Mines ParisTech, sous la direction de N.Maïzi, V.Mazauric, S.Delosse, E.Assoumou, et O.Cottet, 2011.



NOTES

[illegible]





33 rue Rennequin
75017 - PARIS
Tél : +33(0)1 55 35 25 50
com@anrt.asso.fr
www.anrt.asso.fr