

10 priorités stratégiques de R&D sur l'énergie pour la relance de la France

Elaborées dans le cadre des travaux du groupe de travail SNRE présidé par M. Olivier Appert, membre de l'Académie des technologies

L'ANRT fédère les principaux acteurs de la recherche, du développement et de l'innovation publics et privés opérant sur le territoire national. Élaboré à partir de l'expérience de ses membres, réunis depuis trois ans dans un groupe de travail présidé par Olivier Appert, ce texte porte la contribution de l'ANRT au projet de plan de relance gouvernemental au prisme de la stratégie nationale de la recherche sur l'énergie. Dans un contexte de déséquilibre économique, d'urgence climatique, et de forte compétition internationale, l'énergie est un secteur où la France et l'Europe doivent prendre des positions fortes sur des technologies à développer et à créer, notamment celles qui accompagnent la transition énergétique. Pour cela, investir en R&D à court et moyen terme, en associant étroitement les efforts publics et privés, est indispensable pour relancer la compétitivité industrielle de la France et tenir les objectifs de décarbonation. La feuille de route de chaque sujet doit résulter d'une vision stratégique systémique qui tienne compte de notre positionnement international.

Depuis trois ans, les travaux menés sur la SNRE ont fait ressortir un certain nombre d'alertes quant aux évolutions du système énergétique¹ :

- **L'insertion croissante des EnR intermittentes** qui peuvent déstabiliser l'équilibre des réseaux au-delà d'un certain seuil de pénétration.
- **L'articulation entre ces EnR variables et les moyens conventionnels de production tels que le nucléaire** pour garantir la continuité de fourniture et la sécurité d'approvisionnement électrique tout en répondant aux objectifs de décarbonation à moyen terme.
- **L'intégration des innovations technologiques et sociétales, et leurs impacts sur la résilience du système électrique** : numérique (équipements intelligents, données) ; électronique de puissance ; véhicules électriques ; production décentralisée et autoconsommation.
- La **cyber-vulnérabilité** du système.
- **La faiblesse des marchés européens de l'énergie** quant à l'envoi de signaux de long terme nécessaires aux investissements dans les technologies et les processus industriels de la transition : nouvelles filières de production ou mécanismes de flexibilité tels que le stockage.
- **La difficulté à susciter la confiance envers les modèles d'aide à la décision.** Émerge en effet le besoin d'une modélisation multidimensionnelle et systémique, avec des hypothèses plus transparentes. Celle-ci devrait fait interagir tous les vecteurs d'énergie disponibles, et confronter toutes les **échelles spatiales et temporelles de la transition énergétique** : de l'hyper-local au national et jusqu'à la maille européenne ; et du temps réel jusqu'à plusieurs décennies dans l'avenir.

¹ cf. annexe en page 3

- **La coordination encore difficile à mettre en place entre l'ensemble des acteurs du système énergétique européen** : États, collectivités territoriales, gestionnaires de réseaux, producteurs et (auto)consommateurs.
- **L'intensification de la concurrence au niveau mondial**, et notamment l'influence du monopole industriel asiatique et américain (GAFAM) sur les capacités d'innovation en Europe.

À l'aune de ces alertes, l'ANRT a identifié dix priorités de R&D à court terme :

1. Garantir la **sécurité d'approvisionnement** en tenant compte des **dimensions spatiales et temporelles des moyens de flexibilité** utilisables dans le système électrique.
2. Intensifier la recherche sur le **stockage inter-saisonnier** pour lequel il n'existe à date aucune solution économiquement viable.
3. Analyser et confronter les **coûts d'investissement et d'exploitation** des nouvelles solutions par rapport aux **bénéfices économiques** à long terme que celles-ci vont générer pour tous.
4. Développer de nouvelles solutions de **contrôle commande** et de **pilotage intelligent** des réseaux d'électricité.
5. Favoriser les **synergies possibles entre différents vecteurs énergétiques** dans le développement de solutions technologiques : électricité, (bio)gaz, chaleur, hydrogène...
6. Mettre en place une **réglementation** permettant de mettre en visibilité et de rentabiliser les actifs qui ont de la valeur selon les différentes architectures de marché.
7. Utiliser les exercices de **modélisation systémique** comme outils d'aide aux décisions d'investissement fiables et partageables entre tous les acteurs du système.
8. Sélectionner les solutions les plus prometteuses à déployer en fonction de leur potentiel et du **niveau de maturité des technologies** qu'elles utilisent (TRL²).
9. Capitaliser sur les enseignements des **démonstrateurs**, et concentrer les investissements sur un nombre plus restreint de projets prototypes mais qui seront portés à maturité.
10. **Industrialiser à une échelle compétitive les technologies d'avenir** où la France dispose d'atouts et d'une force de frappe industrielle : électronique de puissance et contrôle-commande intelligent, batteries, hydrogène vert... Ne pas négliger ou perdre l'expérience industrielle acquise sur les **technologies ayant fait leur preuves** (ex : nucléaire).

L'annexe associée à cette note présente les éléments techniques des réflexions du groupe de travail sur le système électrique.

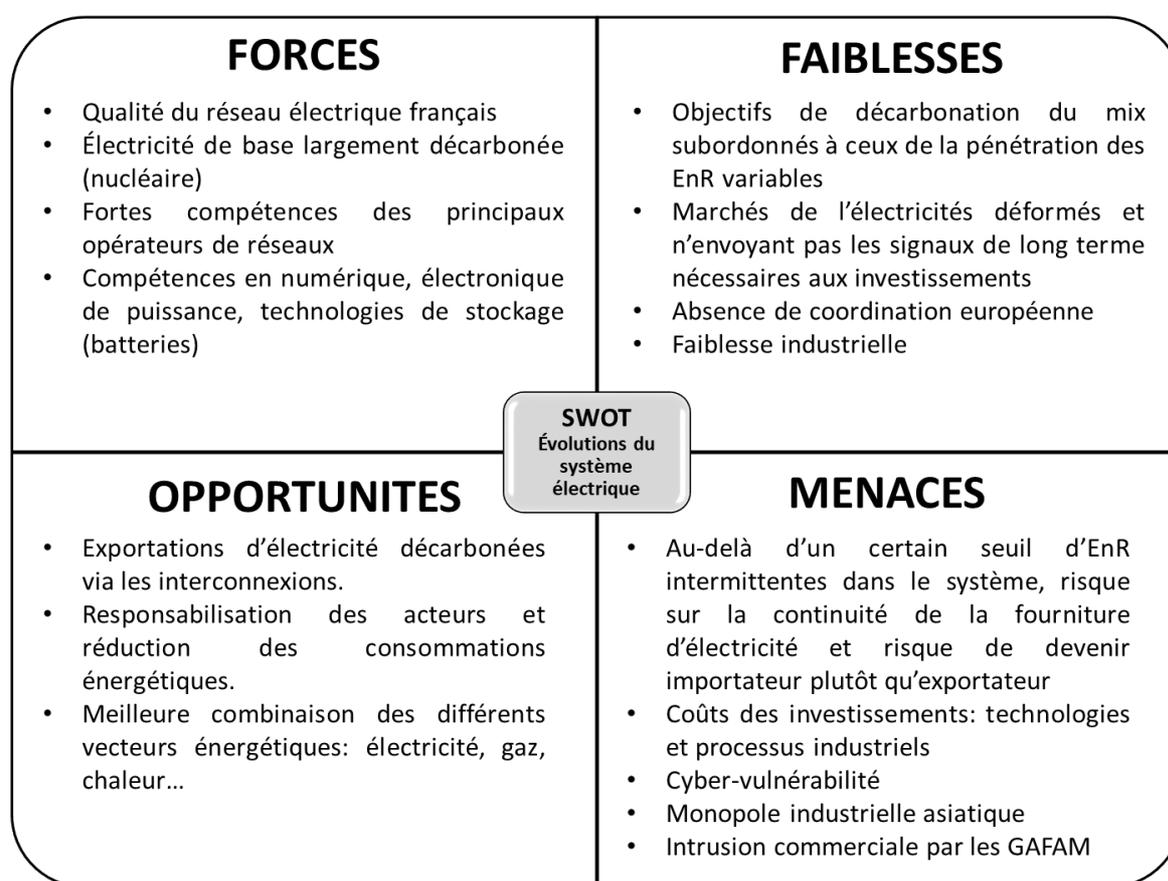
² *Technology readiness level* ou niveau de maturité technologique

ANNEXE³

Depuis 2018, les travaux réalisés par l'ANRT ont eu vocation à faire émerger **les priorités de recherche et développement à mener sur les réseaux électriques**, dans un contexte de transformations profondes et durables qui reconfigurent aujourd'hui le système énergétique à l'aune des enjeux énergie-climat. Une fois ces priorités définies, les travaux menés se sont penchés sur deux problématiques particulièrement saillantes : **la modélisation prospective des réseaux électriques et les moyens de flexibilité au sein du système électrique**.

1. Contexte : les évolutions du système électrique et les priorités de R&D à instruire

L'analyse des transformations subies par le système électrique fait apparaître le diagnostic suivant en termes de forces et faiblesses par rapport aux opportunités et menaces de l'environnement européen (analyse SWOT) :



Les axes de recherche et développement identifiés par l'ANRT dans ce contexte de transformations des systèmes électriques concernent :

- i) La nécessité d'adopter un **pilotage « hybride » de la production d'électricité**, aussi bien centralisé via les moyens conventionnels tels que le thermique ou le nucléaire, que décentralisé via les énergies renouvelables intermittentes telles que le PV ou l'éolien, et les boucles de production locales réparties sur l'ensemble du territoire. Ce pilotage doit

³ Les éléments relatifs à la flexibilité, thématique des travaux 2020, sont en cours d'élaboration par le GT SNRE.

permettre une **répartition de l'intelligence de contrôle** et **préservier la stabilité des infrastructures de réseaux**.

- ii) Le besoin d'une **modélisation multi-échelle** associant électrotechnique et électronique, destinée à éclairer les pouvoirs publics et les entreprises sur leurs calendriers d'investissements à moyen et long terme.
- iii) L'intégration de **l'électronique de puissance** dans les processus de contrôle et de pilotage des réseaux de plus en plus décentralisés.
- iv) L'émergence de **mécanismes de flexibilité** dans le système électrique, et tout particulièrement les progrès en matière de **stockage** de l'électricité : densité énergétique et durée de vie accrues, diminution des coûts, amélioration des cycles de charge, prise en compte des impacts environnementaux tels que l'exploitation des métaux rares et la pollution générée.
- v) L'émergence de la **filière hydrogène**, son acceptabilité du point de vue des risques de sûreté liés à son exploitation, et sa rentabilité économique.
- vi) La valorisation des **interactions entre différents vecteurs énergétiques** : électricité, gaz, chaleur, hydrogène...
- vii) La **numérisation** du système électrique et l'intégration de la **donnée** pour son utilisation par les collectivités, son partage, ou son stockage ; et des nouvelles technologies d'information dans le pilotage des réseaux : intelligence artificielle, blockchain, objets connectés...
- viii) La question de la **cybersécurité** et de la protection des réseaux face aux cyberattaques.

2. La modélisation des réseaux électriques comme outil d'éclairage et d'aide à la décision

Modéliser de manière prospective les évolutions du système électrique aura pour ambition d'orienter les décideurs politiques et les entreprises dans les choix d'investissements permettant d'évoluer vers une trajectoire bas carbone telle que préconisée par la SNBC et mise en application dans la PPE. À l'aune de cet objectif, les réflexions de l'ANRT ont relevé un certain nombre de leviers qui conditionnent le succès des travaux des modélisateurs :

- (i) Susciter la confiance entre tous les acteurs du système électrique à travers une **plus grande transparence** des modèles et une **cohérence accrue** dans les hypothèses utilisées.
- (ii) Afficher la **sensibilité des résultats** aux variations des données d'entrée, notamment en fonction du degré d'**incertitude** associé à l'évolution de ces données sur le long terme.
- (iii) Adopter une **vision systémique** qui intègre une pluralité de dimensions dans les modèles : macroéconomiques, climatiques, techniques, humaines et sociales, multi-vecteur et multisectorielle.
- (iv) Renforcer les **collaborations**, les **échanges** et la **mise en commun** des méthodes et des travaux entre modélisateurs européens, et plus particulièrement entre équipes françaises.

3. L'émergence de la flexibilité au sein du système électrique : état des lieux

La problématique de la flexibilité fédère les nouveaux défis auquel le système électrique est aujourd'hui confronté : pénétration des EnR et équilibre offre-demande, dérégulation des marchés de l'électricité, réinvestissements dans les réseaux en fin de vie, modalités d'investissements dans de nouvelles infrastructures. Elle s'insère par ailleurs dans un écosystème composé d'une pluralité d'acteurs : producteurs décentralisés, gestionnaires de réseaux, (auto)consommateurs ou encore communautés énergétiques locales.

Enjeux autour des différents mécanismes de flexibilité

Du côté de la production, le profil très saisonnalisé des EnR intermittentes et leur moindre prévisibilité par rapport aux moyens de production conventionnels sont les principaux inducteurs de flexibilité dans le système électrique. La flexibilité de la production vise donc à compenser les fluctuations des énergies non pilotables dont la part augmente sur le territoire. Les principaux leviers de flexibilité sont : l'usage de **moyens de production pilotables (nucléaire, thermique, hydraulique)**, **l'écrêtement de production EnR**, les infrastructures de réseaux et notamment les **interconnexions** qui permettent le foisonnement de la production à une maille nationale, ainsi que le **stockage stationnaire** de courte durée tel que les STEP⁴ ou les batteries utilisées pour le réglage de fréquence. Se pose toutefois la question de la programmation du développement de ces leviers, et plus particulièrement de la supervision des plans d'investissement et de financement des moyens de flexibilité, de leur coordination au niveau national et européen, des architectures de marché permettant de les valoriser, et des risques techniques associés à leur déploiement : maintien de la stabilité des réseaux à tout moment ou encore plans de protection.

Du côté de la consommation, les principaux gisements résident dans le **pilotage de la demande**, notamment dans l'industrie lourde et électro-intensive, bien que la question des incitations à modifier les processus industriels de production face aux coûts et aux risques qu'ils entraînent reste entière. Le déploiement des véhicules électriques et le pilotage de la charge de manière structurelle (ex : programmation du chauffage) et dynamique (ex : effacements de pointe) représenteront dans le futur les principales réserves de flexibilité. Les efforts de recherche dans les systèmes d'information et l'intégration du numérique dans le pilotage local des flexibilités permettront de développer ces leviers.

Facteurs-clés de succès pour le déploiement à grande échelle des flexibilités

Le développement de la flexibilité sera tributaire de plusieurs paramètres: une meilleure **sensibilisation et prise de conscience du consommateur** quant au maintien de la qualité de service associée aux services de flexibilité dont il va bénéficier ; une **sobriété** globalement plus élevée dans la demande d'énergie ; la **diminution des pointes de consommation** électrique et des investissements qu'elles génèrent (ex : renforcements réseaux) ; et un meilleur arbitrage entre les **investissements des collectivités en matière d'énergie**, quel que soit le vecteur considéré : électricité, gaz, ou chaleur.

Néanmoins, ces leviers sont contrebalancés par un certain nombre de contraintes à intégrer dans les processus de développement des flexibilités : les problèmes de **disponibilité et de traitement des données** générés par le pilotage en temps réel ; les besoins de **contrôle commande intelligent** jusqu'à la maille de l'utilisateur via les smart grids ; la question de la **fiabilité** et de la **garantie des services de flexibilité** pour les producteurs et les consommateurs.

Rôle des futurs marchés de la flexibilité

Le développement des flexibilités est aujourd'hui confronté à une contradiction d'ordre économique : comment financer et valoriser les investissements de long terme sur la production, les réseaux, le stockage, ou encore les modifications de processus industriels face à un marché à composantes multiples qui reçoit des signaux à court terme qui sont incomplets ? Les investissements dans les actifs permettant d'accroître la flexibilité risquent de ne pas être rémunérés par les marchés actuels.

⁴ Stations de transfert d'énergie par pompage

Il est donc primordial pour la puissance publique de s'engager dans une réflexion tant sur le **développement des technologies de flexibilité**, et donc sur le mix électrique cible post-2035, que sur leur **financement** et sur la **réglementation** associée : coordination nationale des investissements, envoi des bons signaux de prix, incitation à leur déploiement via aides de type subventions.

Perspectives de développement du stockage

Les différentes technologies de stockage de l'énergie disponibles possèdent des performances spécifiques : quantité d'énergie stockée, capacité, température d'usage, masse volumique, nombre et durée des cycles de charge/décharge... Ces performances les positionnent chacune sur des applications et usages dédiés, notamment par rapport à la durée de stockage souhaitée et la rentabilité économique associée.

Concernant l'**hydrogène**, les questions en suspens sont relatives à l'ensemble de sa chaîne de valeur : tout d'abord les coûts et les rendements de production des installations existantes et des nouvelles unités de production à créer, puis le coût généré pour son acheminement sur les infrastructures de distribution de gaz et enfin ses usages finaux tels que la mobilité, sans oublier bien entendu la sécurité liée à sa manipulation et à son exploitation. Les réponses à ces questions seront conditionnées par une montée en compétence des industriels, notamment à travers les retours d'expérience et les effets d'apprentissage cumulés au cours du temps, ainsi que par des ruptures technologiques innovantes telles que le développement d'électrolyseurs performants et durables.

Le développement du stockage devra également intégrer des possibilités nouvelles permises par d'autres vecteurs tels que le **biogaz** ou la **chaleur**, à travers l'intérêt qu'ils suscitent par rapport à leurs coûts d'investissement et d'exploitation et à leurs rendements d'énergie.

Dimension européenne de la flexibilité

Les nombreux projets de démonstration en Europe témoignent de l'intérêt relatif à la flexibilité pour atteindre les objectifs de la transition énergétique. Capitaliser sur le retour d'expérience des démonstrateurs permettra ainsi d'en tirer les grands enseignements et de sélectionner de nouveaux projets à lancer et à mener à terme.

Outre les démonstrateurs, le doublement des besoins de flexibilité électrique d'ici 2040 représente un enjeu majeur. Les interconnexions entre États européens permettront de répondre à une partie de ces besoins et joueront un rôle essentiel pour compenser l'incertitude liée à la prévisibilité des technologies locales de production (EnR). Se pose en revanche la question des risques aux frontières liés à l'importation d'électricité issue de sources carbonées afin de pallier l'instabilité générée sur le réseau par la pénétration importante d'EnR. En outre, le développement des différents leviers de flexibilité dépendra largement du cadre réglementaire européen ainsi que des incitations fiscales, des dispositifs de soutien, et des architectures de marché.

4. Préparation d'une feuille de route sur la flexibilité : axes de recommandation de l'ANRT

Besoins de recherche

Il est impératif de renforcer les besoins de recherche permettant d'**amener à maturité les technologies** qui commencent à être déployées dans le cadre des démonstrateurs en cours. Ceci concerne : **(i) les équipements** tels que les dispositifs d'injection, de coupure, ou de protection, les

réseaux intelligents, **ainsi que leur pilotage** ; **(ii) les moyens de stockage** comme l'hydrogène ou les batteries ; et **(iii) les sources de production** de type EnR, biogaz, mais également le nucléaire qui joue un rôle fondamental pour garantir la stabilité des réseaux. Ces besoins doivent être impérativement complétés par la recherche en **économie et en modélisation** permettant de prévoir et de suivre l'activité du système électrique à tous les niveaux, de dimensionner les investissements, d'éclairer le fonctionnement du marché et les pouvoirs publics, et d'identifier des modèles d'affaires rentables pour les industriels sur le long terme.

Décisions à prendre par la puissance publique

Les choix cruciaux conditionnant l'avenir des flexibilités et plus généralement de nos systèmes énergétiques doivent s'articuler autour : **(i) du mix électrique de production** compte tenu des ressources naturelles disponibles, de la sécurité liée à leur exploitation, et de leur rentabilité ; **(ii) des repères de long terme** indispensables pour fournir un point d'appui aux **marchés de l'énergie** dans le cadre européen, tels que l'envoi de signaux économiques incitatifs aux acteurs du marché ; **(iii) des règles d'accès** permettant de mettre en visibilité et de rentabiliser les actifs qui ont de la valeur, avec entre autres une adaptation des architectures de marché et/ou des grid codes ; et **(iv) de la coordination nationale des investissements** qui permettra à terme de planifier l'intégration croissante des EnR et des nouveaux usages sur les réseaux.

Interactions entre acteurs

La reconfiguration durable du paysage énergétique européen a conduit à de nouvelles règles de marché mais aussi à l'apparition de nouveaux métiers et de nouveaux acteurs : agrégateurs et opérateurs de flexibilité, nouveaux fournisseurs d'électricité, pilotes énergétiques locaux, acteurs des technologies de l'information... La coordination entre ces acteurs est indispensable et permettra une adéquation entre : **(i) les technologies qui seront conçues et déployées** : nouveaux équipements, nouveaux moyens de production ou de stockage ; **(ii) l'évolution des processus industriels de production** : nouveaux procédés de fabrication dans les usines ; et enfin **(iii) l'évolution des marchés de l'énergie**: contrats de fourniture proposés aux clients, adaptation de la tarification...