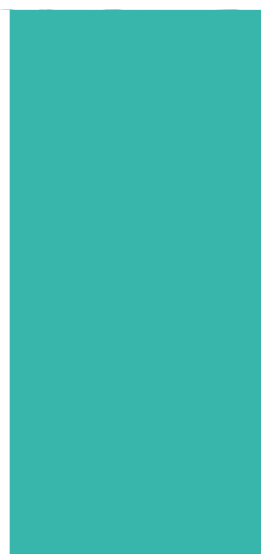
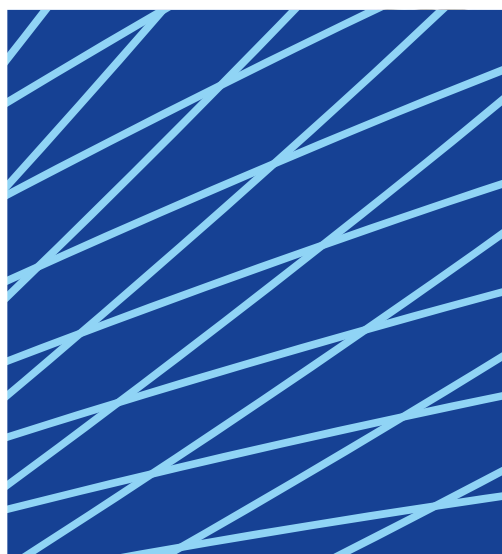




Le réseau
de transport
d'électricité

Orientations stratégiques de la R&D

2025-2028





Sommaire

1. Introduction	4
2. Objectifs du plan R&D 2025-2028	6
2.1 Préparer une transformation majeure et jalonnée du système énergétique français en embrassant trois dimensions fondamentales	7
2.2 Concourir à la réalisation réussie des trajectoires d'investissement du SDDR	11
2.3 Concourir à la transformation du fonctionnement et de l'exploitation du système électrique	23
2.4 Anticiper et prendre en compte les facteurs de risque et de bouleversement exogènes majeurs	37
2.5 Un objectif transverse de collaboration et co-construction au service des précédentes finalités	48
3. Modèle de R&D mis en œuvre	51
3.1 Croissance et accélération	52
3.2 Créer et exploiter davantage d'opportunités de collaboration pour mutualiser les ressources et accélérer le rythme de l'innovation	53
3.3 Renforcer les collaborations R&D transport-distribution	54
4. Programmes et feuilles de route	56
4.1 Programme « Prévisions et équilibre offre-demande court-terme » (PCTEO)	57
4.2 Programme « Pilotage du réseau » (PILOT)	58
4.3 Programme « Maîtrise et simulation de la stabilité du réseau » (MAESTRO)	59
4.4 Programme « Tension, Protection, Stabilité » (TENPOS)	60
4.5 Programme « Gestion des actifs » (GA)	62
4.6 Programme « Futurs cyber-physiques et éco-conçus des infrastructures du réseau » (FCEIR)	65
4.7 Programme « Climat, Équilibre Offre-Demande et Réseau long terme » (CLER)	67
4.8 Programme « Environnement, société et prospective » (PEPS)	69
4.9 Programme « Partenariats, valorisation, transformation et stratégies transprogrammes » (PRISME)	72
Annexe : échelle de représentation de la maturité des activités de R&D	74





Introduction



La Recherche et Développement de RTE innove pour permettre à RTE d'accomplir ses missions présentes et futures de manière efficiente et résiliente, pour identifier et réussir les transformations du réseau public de transport d'électricité requises par les politiques énergétiques française et européenne (transition énergétique et écologique, souveraineté, compétitivité économique), pour anticiper les risques et opportunités et préparer l'avenir.

La R&D est principalement financée par un mécanisme de régulation incitative dans le cadre du TURPE. Le présent plan R&D se rapporte à la période «TURPE 7», de 2025 à 2028.

RTE identifie des besoins de R&D accrus pour la période «TURPE 7». Ces besoins se justifient par les perspectives de transformation du système énergétique, telles que dépeintes dans

les récentes études prospectives de RTE, et qui mettent en évidence trois axes prioritaires pour la feuille de route 2025-2028. Ces trois axes se déclinent en 11 objectifs de R&D qui précisent les problématiques auxquelles les actions de R&D ambitionnent de répondre. Pour atteindre ces objectifs, 37 domaines d'activité ou «objets de R&D» sont identifiés. Le chapitre 2 décrit ainsi la consistance du Plan R&D TURPE 7 au travers des 3 axes, 11 objectifs et 37 objets de R&D.

Pour accomplir les objets de R&D identifiés et atteindre les objectifs correspondants, RTE ajuste son modèle de R&D au regard de l'expérience passée et de l'évolution du contexte et des enjeux. Ces évolutions concernent principalement la répartition cible de l'effort R&D par niveau de maturité et le renforcement des collaborations. Elles sont exposées au chapitre 3.



Objectifs du plan R&D 2025-2028



2.1 Préparer une transformation majeure et jalonnée du système énergétique français en embrassant trois dimensions fondamentales

L'étude *Futurs énergétiques 2050*, publiée par RTE en 2021, esquisse des scénarios de transformation profonde du système énergétique français pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

Ces scénarios partagent plusieurs caractéristiques communes : une réduction de la consommation finale d'énergie (grâce à l'efficacité énergétique et à la sobriété), accompagnée à la fois d'une hausse de la part de l'électricité (notamment par l'électrification des usages) et d'une augmentation globale de la consommation d'électricité. Parallèlement, les énergies renouvelables connaissent une forte croissance dans la production d'électricité.

L'étude Bilan prévisionnel 2023-2035, publiée à l'automne 2023, actualise la première période

de *Futurs énergétiques 2050*, à mi-parcours de l'objectif de neutralité carbone du pays. De nouveaux paramètres sont pris en compte dans cette mise à jour : durcissement du contexte géopolitique et économique mondial (guerre en Ukraine, crise énergétique), volonté de la France de renforcer sa souveraineté industrielle et énergétique, nouvelles ambitions climatiques et de décarbonation. Cette étude confirme la nécessité d'une transformation plus rapide du secteur électrique pour permettre à la France d'atteindre ses objectifs rehaussés : lutter contre le dérèglement climatique en respectant le *Fit for 55*, renforcer sa souveraineté énergétique et réussir sa réindustrialisation. En accord avec ces objectifs, l'étude propose des scénarios A dits « Accélération réussie » pour analyser les conditions de réussite de la transformation souhaitée.

FIGURE Comparaison des trajectoires d'évolution de la consommation d'électricité dans le Bilan prévisionnel 2023 et les *Futurs énergétiques 2050* et détail de la répartition par secteur dans la trajectoire de référence à l'horizon 2035

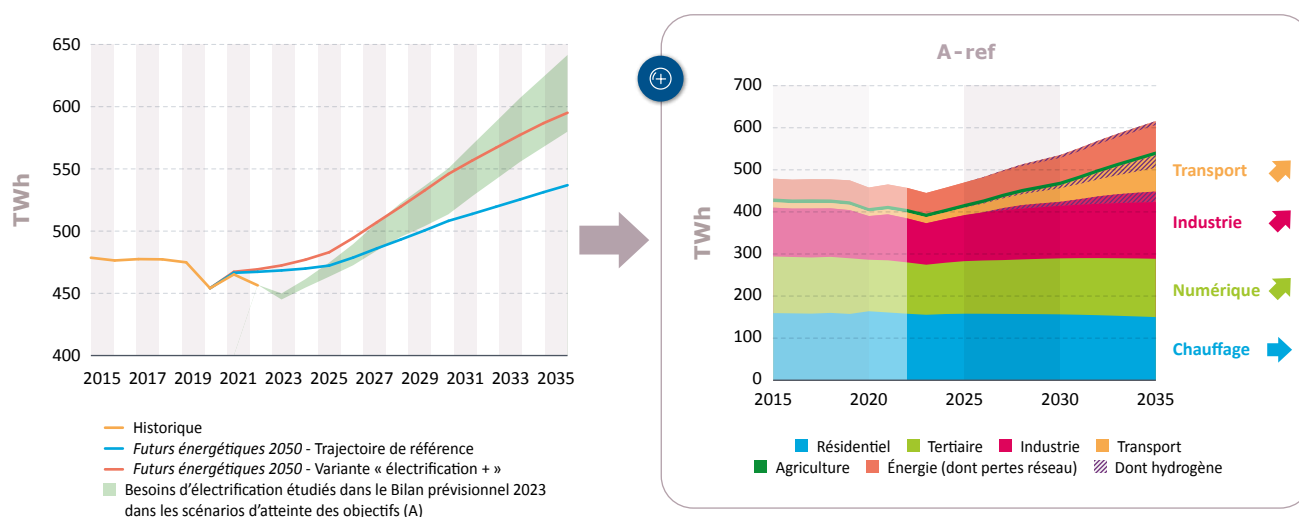
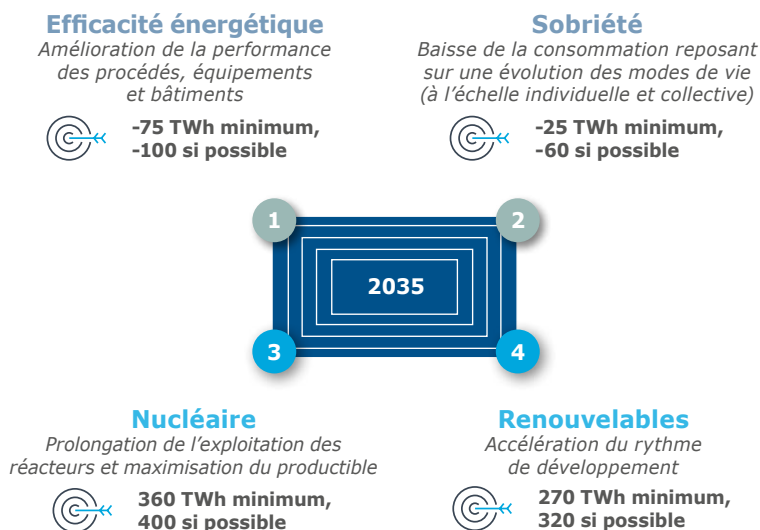


FIGURE Les leviers identifiés pour atteindre les objectifs climatiques et de souveraineté énergétique à l'horizon 2035

Des besoins d'électricité qui augmentent
dans tous les secteurs pour assurer
la sortie des énergies fossiles
et réindustrialiser la France



Quatre leviers essentiels pour couvrir ces besoins
Quelques degrés de liberté subsistent dans les choix politiques
et les solutions mais les marges de manœuvre restent limitées



L'État a publié en novembre 2023 un projet de stratégie française pour l'énergie et le climat et l'a soumis à consultation publique jusqu'à la fin d'année 2023. Les orientations qui y sont présentées sont alignées avec le cadre des scénarios A «Accélération réussie» du Bilan prévisionnel 2023-2035.

Dans cette continuité, RTE a publié en 2025 le Schéma décennal de développement du réseau (SDDR), consistant en un plan-programme stratégique d'identification des besoins d'évolution de l'infrastructure du réseau de transport d'électricité sur la période 2025-2040, et de propositions d'options structurelles et technologiques pour répondre à ces besoins, avec une vision d'ensemble optimisée et séquencée. Le SDDR 2025 révèle un besoin d'investissement en forte croissance et accélération, totalisant de l'ordre de 100 milliards d'euros sur la période 2025-2040.

La contribution à une mise en œuvre réussie de la vision du SDDR, c'est à dire une adaptation du réseau économiquement performante, robuste aux incertitudes, avec maîtrise des risques techniques et technologiques, assu-

rant la qualité de service d'accès au réseau et d'alimentation attendue et mise en œuvre dans des délais convenables, est une première priorité stratégique qui doit guider la feuille de route R&D en TURPE 7.

Outre l'enjeu d'évolution des infrastructures et des équipements du réseau, la transformation du système énergétique français requiert également une adaptation en rupture des processus et dispositifs assurant le fonctionnement opérationnel du système électrique et garantissant la continuité de l'alimentation et la qualité de l'électricité. En effet, les projections à l'horizon 2030-2035 des conditions d'exploitation du système électrique révèlent d'importants bouleversements :

- ▶ Les principes de fonctionnement du système électrique se complexifient, avec des incertitudes sur les injections en forte croissance, des transits de variabilité accrue, aussi bien au niveau local que pan-européen, des interactions plus complexes avec les réseaux de distribution.
- ▶ L'introduction massive d'interfaces de conversion à électronique de puissance (pour la connexion au réseau de sites de production, de consommation et de lignes

HVDC) dont les comportements sont moins «linéaires» que les composants traditionnels du réseau et qui ne procurent pas intrinsèquement les effets stabilisateurs et autorégulateurs de ceux-ci (inertie mécanique des alternateurs, sensibilité de la charge à la tension et à la fréquence), modifie progressivement le comportement électrotechnique du réseau, compromettant à terme l'efficacité des dispositifs qui permettent aujourd'hui d'en assurer le bon fonctionnement et la sûreté (stabilité dynamique, plans de protections et de défense, respect des critères de qualité de l'électricité et notamment de qualité de la tension).

- ▶ En parallèle, l'architecture de contrôle du réseau évolue pour intégrer davantage d'automatismes distribués dans le système, avec pour double finalité d'accroître les capacités du réseau à accueillir de nouveaux usages et de tirer parti d'une automatisation avancée pour gérer une part des aléas opérationnels, notamment aux très courtes échéances temporelles.
- ▶ La flexibilité de la demande doit se développer prioritairement et en masse pour devenir une composante du mix électrique à part entière et apporter une contribution essentielle à la continuité d'approvisionnement et à l'optimisation du système en faisant correspondre au mieux consommation et production d'électricité décarbonée, ainsi que l'ont montré les analyses du Bilan prévisionnel 2023-2035.
- ▶ L'exploitation du système électrique va devoir s'accommoder de phases de travaux importantes pour répondre aux enjeux du SDDR avec les consignations d'ouvrages pour maintenance associées qui fragilisent le réseau électrique.

La recherche et le développement de solutions pour la transformation du fonctionnement opérationnel du système électrique constituent donc une deuxième priorité pour TURPE 7.

Enfin, outre les orientations et objectifs donnés par les politiques énergétiques française et européenne évoquées en introduction de ce chapitre, la stratégie industrielle de RTE doit tenir compte de facteurs exogènes qui

risquent d'affecter avec plus ou moins de certitude et plus ou moins de force les plans de développement ou le bon fonctionnement du réseau de transport d'électricité, voire plus largement de la filière de l'énergie ou encore plus largement la société dans son ensemble. Les principaux facteurs de bouleversement exogènes identifiés à ce jour sont :

- ▶ le changement climatique qui affectera vraisemblablement un large éventail des missions de RTE, et dont les projections, plus pessimistes d'année en année, renforcent la nécessité et l'urgence d'y préparer rigoureusement le système électrique français¹,
- ▶ le risque de concurrence mondiale accrue pour l'accès aux matières et technologies nécessaires à la réalisation des systèmes énergétiques futurs, avec de récents signaux suggérant que les filières d'approvisionnement, mondialisées, pourraient connaître des défaillances récurrentes sous l'effet cumulé d'une croissance massive de la demande pour répondre aux besoins globaux de renouvellement d'infrastructures vieillissantes et de développement de nouvelles filières énergétiques décarbonées², de disponibilités critiques de matières premières et de tensions géopolitiques,
- ▶ un renforcement notable des exigences réglementaires d'éco-conception, dans le but de contraindre les acteurs économiques à prendre en compte les enjeux de protection de l'environnement et de la biodiversité, et de sobriété de consommation des ressources, se concrétisant notamment par un foisonnement réglementaire et normatif qui aura pour effet de pénaliser les pratiques industrielles moins vertueuses en s'appuyant notamment sur des reportings extra-financiers normalisés et des incitations à orienter les financements au profit d'activités classées « durables ».

Par ailleurs, la dégradation récente des climats géopolitique et économique incite à penser que nous traversons une période d'instabilités accrues. Ce contexte renforce l'enjeu pour RTE de disposer de capacités de prospective solides et de moyens d'analyse de la résilience des stratégies industrielles précitées aux bouleversements exogènes qui pourraient survenir.

1. RTE a été sollicité dans le cadre des travaux relatifs à la Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC), établissant pour scénario de référence environ +4 °C en moyenne sur la France métropolitaine, et devra se conformer au futur Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC3).

2. Comme documenté dans le rapport « Electricity Grids and Secure Energy Transitions » de l'AIE publié en novembre 2023.

La recherche et le développement de solutions pour l'anticipation et la prise en compte des facteurs de risque et de bouleversement exogènes majeurs constitue ainsi la troisième priorité pour TURPE 7.

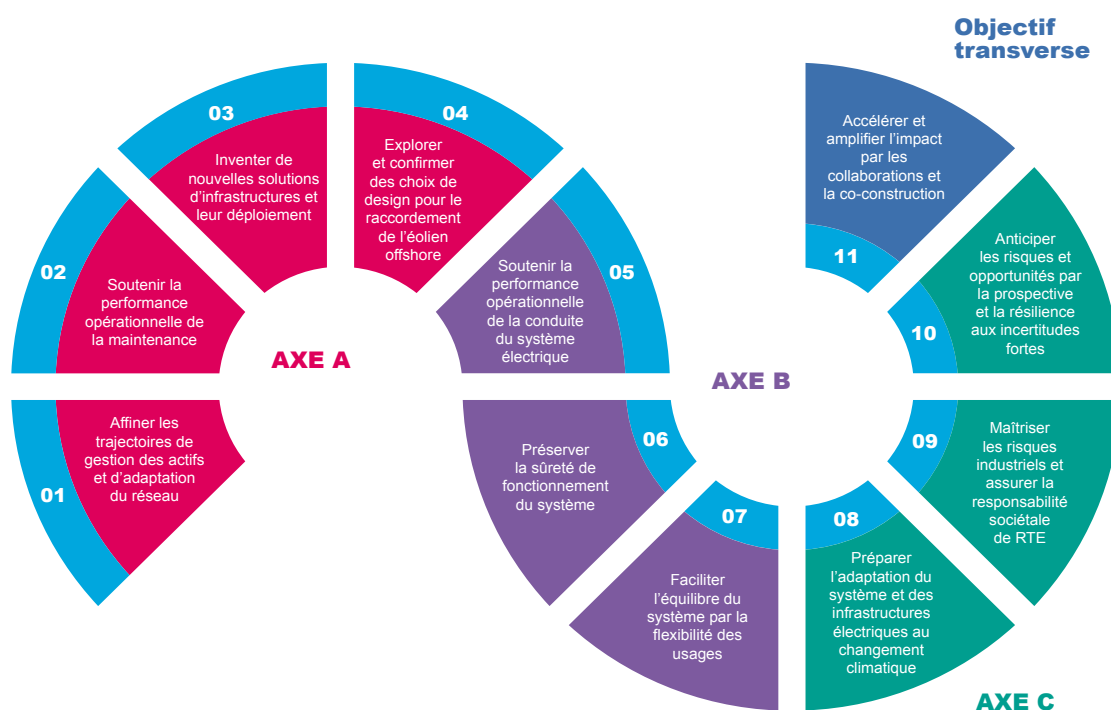
En résumé, la feuille de route R&D pour la période TURPE 7 a été construite en embrassant trois axes prioritaires (ou dimensions stratégiques fondamentales pour le réseau de transport futur) :

A. Concourir à la réalisation réussie des trajectoires du SDDR

B. Concourir à la transformation du fonctionnement et de l'exploitation du système électrique

C. Anticiper et prendre en compte les facteurs de risque et de bouleversement exogènes majeurs.

Les trois précédentes dimensions stratégiques se déclinent en 11 objectifs de R&D qui précisent les problématiques auxquelles les activités de R&D de RTE ambitionnent de répondre. Pour atteindre ces 11 objectifs, 37 domaines d'activité ou « objets de R&D » sont identifiés et focaliseront les activités des Programmes et Feuilles de route pendant la période TURPE 7.



2.2 Concourir à la réalisation réussie des trajectoires d'investissement du SDDR

Quatre objectifs de R&D devront guider la feuille de route R&D en TURPE 7 pour concourir à la réalisation réussie des trajectoires du SDDR 2025 (c'est à dire une adaptation du réseau économiquement performante, robuste aux incertitudes, avec maîtrise des risques techniques et technologiques, assurant la qualité de service d'accès au réseau et d'alimentation attendues et mise en œuvre dans des délais convenables) :

A1. Affiner les trajectoires de gestion des actifs et d'adaptation du réseau par la modélisation technico-économique, l'analyse des risques et l'optimisation robuste.

A2. Soutenir la performance opérationnelle de la maintenance par l'aide à l'inspection du réseau et au diagnostic de l'état des actifs.

A3. Inventer de nouvelles solutions d'infrastructures et leur déploiement pour faciliter et accélérer l'adaptation du réseau aux futurs usages.

A4. Explorer et confirmer des choix de design pour le raccordement de l'éolien offshore en grande profondeur.

Ces objectifs ont d'ores-et-déjà guidé la feuille de route R&D pendant la période TURPE 6, en correspondance avec les trajectoires du SDDR élaboré en 2019. RTE perçoit toutefois un fort besoin d'accélération en TURPE 7, faisant écho à la forte accélération des trajectoires d'investissement³. En effet, les résultats de R&D devront être obtenus suffisamment tôt pour produire les bénéfices industriels d'ici 2040.

A1. Affiner les trajectoires de gestion des actifs et d'adaptation du réseau par la modélisation technico-économique, l'analyse des risques et l'optimisation robuste

Le SDDR 2025 identifie les besoins d'évolution de l'infrastructure du réseau de transport d'électricité sur la période 2025-2040, et propose des options structurelles et technologiques pour répondre à ce besoin, avec une vision d'ensemble optimisée et séquencée. Les besoins d'investissements correspondants sont en forte croissance et accélération, totalisant de l'ordre de 100 milliards d'euros sur la période 2025-2040. La vision du SDDR se déclinera et se précisera dans les programmes d'investissement subséquents.

Les trajectoires prévisionnelles du SDDR posent des défis industriels majeurs sous de multiples aspects : rythme de réalisation, disponibilité de main d'œuvre qualifiée, capacité des

chaînes d'approvisionnement et de sous-traitance, continuité de service sous travaux, capacité de financement et évolution du tarif. Afin de mieux maîtriser les risques posés par ces défis, il sera essentiel de disposer de méthodes permettant d'optimiser en cohérence les décisions de renouvellement et d'extension de réseau, d'effectuer des arbitrages et renoncements en fonction d'un cadre de quantification des risques représentatif des conséquences opérationnelles induites, de mesurer la présence des options disponibles en fonction d'une pluralité de critères et d'apprécier la robustesse des choix aux incertitudes sur les hypothèses sous-jacentes. Ces méthodes devront également intégrer une prise en compte des nouvelles flexibilités, qu'il s'agisse de services de modulation d'usages

3. Triplement des trajectoires d'investissement entre la vision élaborée en 2019 et celle du SDDR 2024, passant de 33 milliards d'euros sur la période 2021-2035 à environ 100 milliards d'euros sur la période 2025-2040.

Localisation des principaux centres de consommation et de production actuels et futurs

Principales évolutions des flux sur le réseau de transport d'électricité à l'horizon 2040

Congestions en 2040 en cas d'absence totale de renforcement de la structure du réseau

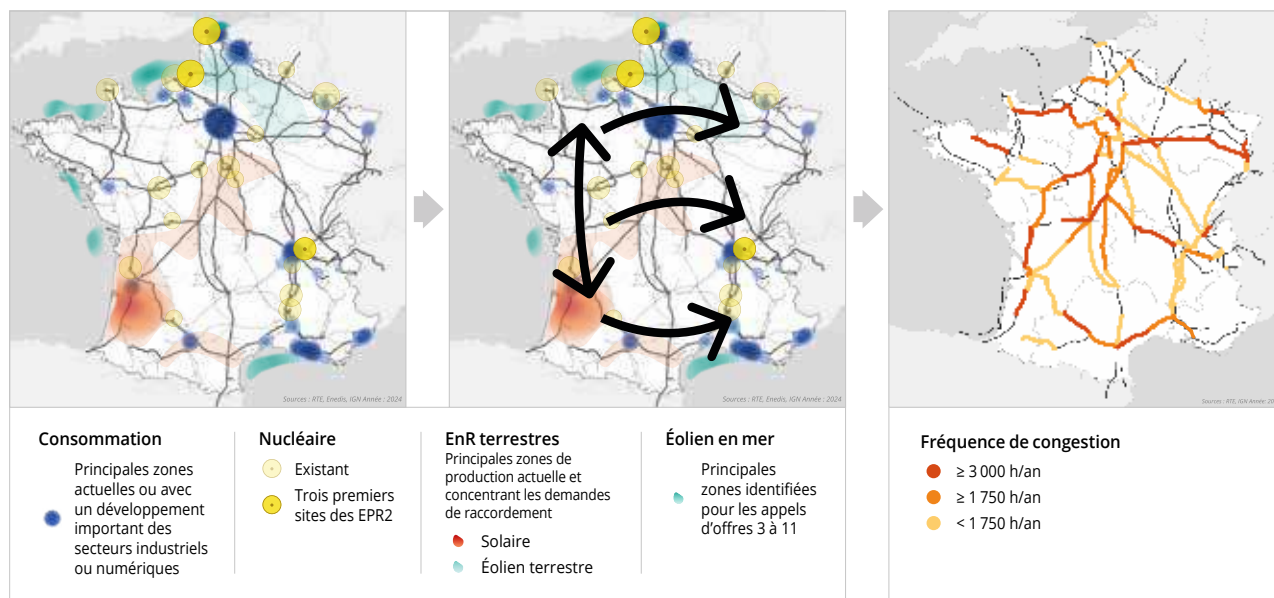


FIGURE Carte des moyens de production issus du projet de PPE 3, des flux sur le réseau et des congestions qu'ils engendrent

ou de systèmes d'automates déployés dans le réseau, afin de valoriser ces leviers comme alternatives au développement d'infrastructures tout en anticipant les conséquences opérationnelles que leur développement massif pourrait engendrer. L'enjeu est de taille : l'identification de leviers d'optimisation appropriés pourrait permettre des gains potentiellement en centaines de millions voire milliard d'euros évités au fil des programmes d'investissement subséquents⁴. Réciproquement, la bonne représentation des risques sous-jacents aux options sera essentielle pour la maîtrise des coûts qui seraient induits par des retards ou des inadéquations entre les infrastructures et les besoins – risques pouvant représenter plusieurs centaines de millions d'euros sur les quinze prochaines années.

En outre, dans un contexte de transformation majeure des usages énergétiques, marqué par des attentes d'accélération des accès au

réseau mais aussi part de fortes incertitudes sur les dynamiques de développement des filières de production et de consommation, les logiques d'adaptation des infrastructures en réaction à la demande sont de plus en plus complexes à mettre en œuvre et font peser un risque d'inadéquation entre l'évolution du réseau et l'évolution des usages. Il semble opportun de doter RTE de méthodes et outils pour planifier le développement du réseau et des capacités de raccordement de façon plus proactive, en anticipation des usages futurs. Cela supposerait de pouvoir modéliser une dynamique d'interaction entre les schémas de développement et les demandes d'accès au réseau (capacité des usages à se localiser en réaction à une offre de capacité) et de disposer de méthodes d'évaluation technico-économique des options d'investissement tenant compte d'incertitudes sur les usages futurs.

4. En se donnant pour objectif un gain d'optimisation de 0,5% à 1% sur une trajectoire d'investissement de l'ordre de 100 milliards d'euros.

Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « A1 » par des travaux dans deux domaines :

Méthodes et outils d'études de réseau et de raccordement

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Concevoir de nouvelles méthodes d'aide à la construction des corpus de données pour les études d'adaptation des réseaux, permettant d'articuler en cohérence différentes échelles géographiques, depuis la modélisation des grands équilibres offre-demande à l'échelle pan-européenne jusqu'à la projection, au niveau des territoires, des scénarios de développement des différentes filières et des besoins d'accès au réseau qui en découlent. ▶ Adapter les méthodes et algorithmes d'études de réseau pour une meilleure prise en compte des nouvelles flexibilités, qu'il s'agisse de services de modulation d'usages ou de systèmes d'automates déployés dans le réseau, afin de valoriser ces leviers comme alternatives au développement d'infrastructures tout en anticipant les conséquences opérationnelles que leur développement massif pourrait engendrer (par exemple, capacité future à effectuer les consignations nécessaire à la maintenance des infrastructures).	Preuves de concepts et démonstrations de méthodes <i>minima</i> viables pour la construction de corpus de données et la prise en compte des flexibilités/automates (accomplissement des TRL 5, 6, 7)	Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Évolution du réseau » Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Décarbonation, électrification et flexibilités de la consommation » Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Modélisation EOD long-terme »
▶ Proposer de nouvelles méthodes de calcul de capacité d'accueil pour différents types de clients (batterie, consommation...), qui prennent en compte différentes modalités contractuelles (ex : nombre d'heures de limitation de leur fonctionnement), et facilitent l'automatisation des calculs afin d'en accroître la volumétrie et la fréquence. Ces méthodes devront aussi assurer une robustesse des calculs (notamment vis à vis de l'ordre d'arrivée des acteurs) et une cohérence avec les méthodes utilisées pour les schémas de développement du réseau.	Formalisation, preuve-de-concept et démonstration d'une méthode minimum viable d'aide à la planification des raccordements (avec un cas d'étude pilote pressenti correspondant au raccordement de batteries).	Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Évolution du réseau »

Optimisation des politiques de gestion des actifs par les théories de la fiabilité et de la décision tenant compte des risques

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Poursuivre les travaux de conception et de dissémination de méthodes et outils permettant l'optimisation de la gestion d'actifs fondée sur l'appréciation des risques et de la fiabilité, avec une attention particulière à la modélisation des conséquences sur le service rendu et à la quantification homogène des risques industriels et opérationnels résiduels. ▶ Participer, dans le cadre de groupes de normalisation, à la standardisation de méthodes de gestion des actifs fondées sur la théorie de la fiabilité pour en conforter la robustesse (rigueur scientifique et pertinence opérationnelle). ▶ Identifier les évolutions requises des politiques de maintenance pour tenir compte des capacités et connaissances apportées par les outils précités et élaborer les méthodes nécessaires à l'évolution de ces politiques.	Après accomplissement en TURPE 6 du TRL 7 (démonstration à l'échelle industrielle) pour les transformateurs mesure et de puissance, nouvelle étape en TURPE 7 pour passer de l'actif au système d'actifs (accomplissement des TRL 5, 6, 7 en T7 – i.e. validation de concept et démonstration)	Programme « Gestion des Actifs » / Feuille de route « Systèmes d'Aide à la Gestion des Actifs (SAGA) »
▶ Élaborer des modèles physiques et statistiques de vieillissement des actifs, en se focalisant sur le système conducteurs-supports-fondations des liaisons aériennes, et sur les câbles de liaisons souterraines et sous-marines, pour ensuite conforter la robustesse de ces modèles physiques par des essais en laboratoire et construire les bases de données nécessaires aux diagnostics (contrôles non destructifs permettant de mieux orienter les actions de renouvellement et de maintenance). ▶ Concevoir, prototyper et expérimenter des outils numériques de simulation et diagnostic de l'état des actifs transformateurs pour aider à la décision d'actions de maintenance selon des critères d'optimalité et de priorité.	Après accomplissement du TRL 7 pour les premiers modèles de vieillissement de câbles aériens en TURPE 6, réorientation et renforcement de l'activité pour modéliser le système conducteurs-supports-fondations des liaisons aériennes, les câbles de liaisons souterraines (accomplissement des TRL 4, 5, 6 et 7 en T7) et les câbles de liaisons sous-marines (accomplissement des TRL 3, 4). Accomplissement du TRL 7 pour des « quick wins » relatifs au SF6 et aux aéroréfrigérants entrepris au cours de TURPE 6 et accomplissement des TRL 4 et 5 pour la modélisation numérique des transformateurs.	Programme « Gestion des Actifs » / Feuille de route « Modéliser, expertiser, prédire le comportement des actifs »
▶ Affiner l'articulation entre les méthodes et outils utilisés pour l'aide à la gestion des actifs et ceux utilisés pour les études de contraintes de transit, afin de mieux tenir compte des interactions réciproques entre les deux processus (modélisation des conséquences de la maintenance sur la disponibilité du réseau, modélisation des valeurs d'usage du réseau pour l'optimisation des décisions de maintenance, aide au placement optimal des consignations tenant compte des risques système et des contraintes de réalisation), avec une attention particulière à la modélisation des conséquences sur le service rendu et à la quantification homogène des risques industriels et opérationnels résiduels.	Formalisation, preuve-de-concept et démonstration de méthodes permettant la co-optimisation renouvellement-ingénierie (accomplissement des TRL 5, 6, 7) et amélioration des méthodes d'optimisation des consignations développées en TURPE 6.	Programme « Gestion des Actifs » / Feuille de route « Systèmes d'Aide à la Gestion des Actifs (SAGA) » Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Évolution du réseau »

A2. Soutenir la performance opérationnelle de la maintenance par l'aide à l'inspection du réseau et au diagnostic de l'état des actifs

Dans un contexte de vieillissement des actifs, et de contraintes climatiques accrues, les activités de maintenance sont essentielles pour préserver la fiabilité, la disponibilité et la sécurité de l'infrastructure de réseau. Par exemple, la surveillance des proximités géométriques entre les lignes aériennes et l'environnement est indispensable, en particulier pour maîtriser les risques d'amorçage avec la végétation qui peuvent non seulement compromettre la qualité d'alimentation électrique des clients mais aussi provoquer des départs de feux en situation de sécheresse. La détection automatisée, dans les composants du réseau, d'anomalies sans conséquence immédiate peut permettre de planifier les réparations, selon leur priorité, pour prévenir la survenue d'incidents fortuits avec risques de coupures d'alimentation, tout en réduisant les renouvellements préventifs de matériel.

Outre le vieillissement des infrastructures, la croissance dans le même temps des ressources (humaines, budgétaires) requises pour adapter à grande vitesse le réseau aux besoins futurs risque de mettre en tension les capacités à faire et à financer à la fois les activités d'ingénierie et de maintenance de RTE. Il est donc opportun de rechercher de nouvelles solutions pour accroître la performance des activités de maintenance et ainsi atténuer les tensions sur ces ressources. Les progrès récents de multiples technologies (IoT, intelligence artificielle, robotique, imagerie satellitaire, numérisation) ouvrent de nouvelles possibilités d'automatisation, de traitement de l'information et d'aide à la décision prometteuses. Il reste néanmoins à concevoir et à démontrer la pertinence technico-économique de nouveaux systèmes fondés sur ces technologies pour des cas d'usages relatifs à la maintenance d'infrastructures de transport d'électricité.

Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « A2 » par des travaux dans le domaine suivant :

Inspection automatique et appui aux interventions		
Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Faire la démonstration de systèmes pour l'inspection des infrastructures, intégrant de façon modulaire et interopérable vecteurs (drones, robots, hélicoptères), capteurs (caméras, lidar) et algorithmes de traitement de l'information (intelligence artificielle). ▶ Faire la démonstration de systèmes de mesure, de contrôle et d'alerte des proximités aux infrastructures (végétation, chantiers, glissements de terrain) à partir d'imagerie satellite.	Accomplissement des TRL 5, 6 et 7, pour des produits minimums viables (vecteur-capteur-IA) relatifs aux infrastructures linéaires et de postes. Accomplissement des TRL 6 et 7, pour des systèmes de gestion des proximités à partir d'imagerie satellite.	Programme « Gestion des Actifs » / Feuille de route « Automatisation de l'inspection du réseau et modernisation des moyens d'intervention »

A3. Inventer de nouvelles solutions d'infrastructures et leur déploiement pour faciliter et accélérer l'adaptation du réseau aux futurs usages

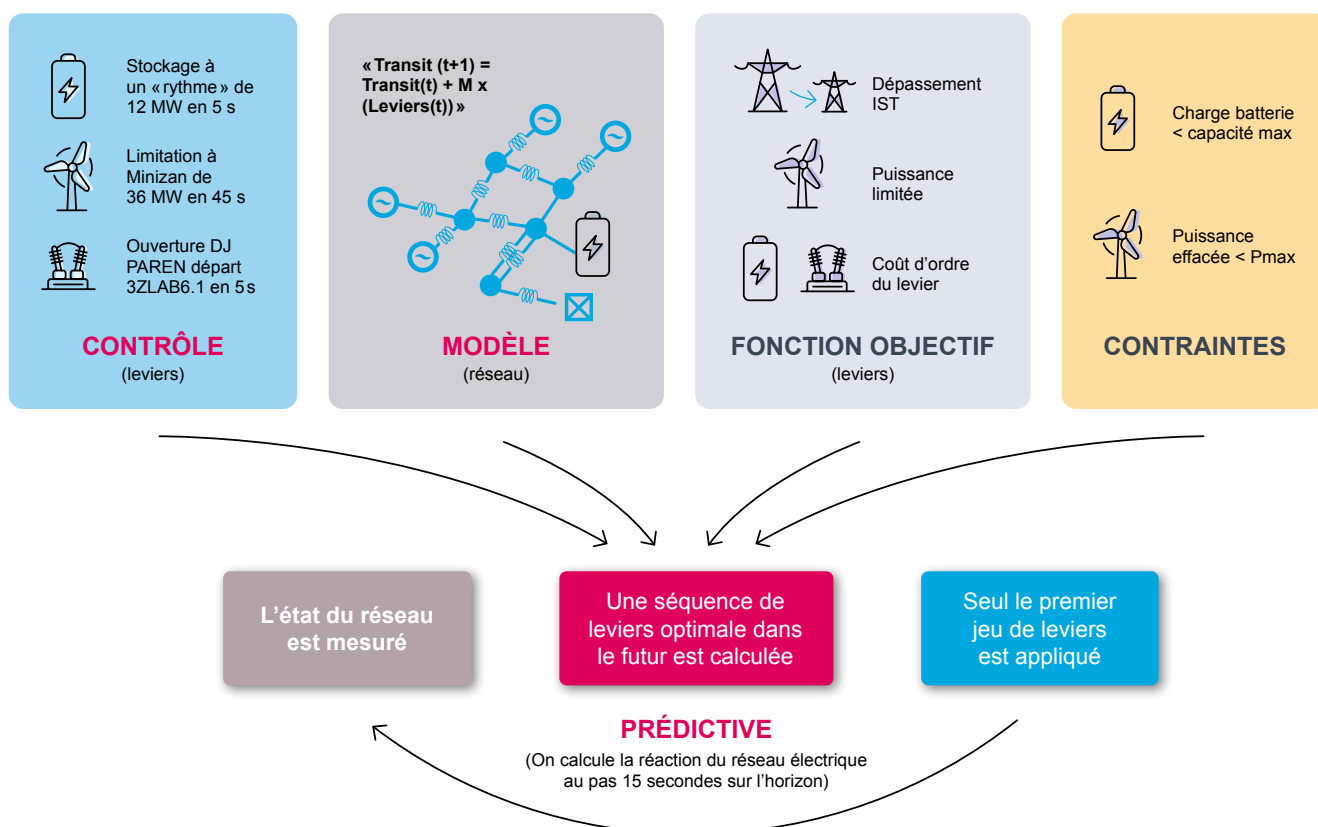
Les trajectoires d'investissement esquissées dans le SDDR pour la période 2025-2040 posent un défi majeur d'accélération du rythme de réalisation des chantiers. Des difficultés sont pressenties à de multiples niveaux tels que la disponibilité de main d'œuvre qualifiée, les capacités des chaînes d'approvisionnement et de sous-traitance, les durées administratives et organisationnelles.

À ces difficultés s'ajoutent des incertitudes concernant les dynamiques de développement des usages énergétiques et des filières de production, ainsi que leur localisation précise, à des horizons compatibles avec les temps de développement d'infrastructures de réseau.

Pour mieux maîtriser ces risques, il sera essentiel pour RTE de disposer d'un maximum des leviers d'agilité pour réduire les besoins d'investissements lourds et longs, raccourcir les délais de mise en œuvre, simplifier les processus, être en capacité à réorienter les chantiers

ou reconfigurer les infrastructures existantes, disposer de solutions palliatives transitoires en attendant la réalisation d'investissements structurels.

Par exemple, des résultats préliminaires d'études réalisées dans le cadre du SDDR révèlent qu'au-delà des bénéfices apportés par les solutions d'automates existantes (dispositifs NAZA : Nouveaux Automates de Zone Adaptatifs), environ 2 à 3 milliards d'euros d'investissements en infrastructures de réseau pourraient être évités à 2040, à condition de disposer de solutions d'aide à la gestion en temps-réel des congestions générées sur les réseaux de tension HTB2 notamment par la croissance de la production renouvelable. De telles solutions consisteraient a priori en une combinaison de systèmes d'automates et d'outils permettant l'analyse de la situation puis la prise de décision rapide par les opérateurs des Centres Opérationnels du Système Électrique (COSE).



Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif «A3» par des travaux dans cinq domaines :

Architecture des systèmes d'automates et nouvelles fonctionnalités de contrôle du système

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Concevoir, d'une part, une architecture des systèmes d'automates fondée sur des principes de modularité, d'évolutivité, d'interopérabilité et de robustesse/résilience pour répondre plus efficacement à une diversité des contextes d'application et faciliter leur démultiplication sur le réseau tout en garantissant la cohérence de fonctionnement et une maintenabilité dans la durée et développer, d'autre part, une plateforme de simulation du fonctionnement de ces systèmes dans leur environnement, qui entremêle le réseau électrique et les infrastructures numériques, permettant ainsi d'appréhender le bon comportement intégré des automates et de valider les propriétés de robustesse et de résilience. ▶ Concevoir de nouveaux systèmes d'automates pour enrichir le catalogue de leviers permettant d'accroître les capacités de transit, de façon pérenne, pour réduire les besoins d'investissement lourds, ou transitoirement, en anticipation d'investissements structurels nécessaires mais plus longs à réaliser.	Après développement en TURPE 6, depuis la preuve de concept au déploiement industriel, des cœurs de calcul des automates NAZA, développement d'une plateforme de simulation pour validation qualification du bon fonctionnement et de la robustesse des automates dans l'environnement cyber-physique intégré (accomplissement des TRL 5 à 7), et démonstration de nouveaux algorithmes pour des cas d'usage non couverts par NAZA (i.e. gestion des contraintes HTB2-HTB3, gestion des contraintes de tension).	Programme « Futurs Cyber-physiques et Eco-conçus des Infrastructures du Réseau » / Feuille de route « Architecture de pilotage du système hybride cyber-physique »

Systèmes de contrôle commande virtualisés

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Poursuivre les collaborations pour faire la démonstration et la qualification de systèmes de contrôle commande virtualisés, en confirmer la rentabilité économique (OPEX et CAPEX) ainsi que les gains d'agilité pour la reconfiguration ou l'aménagement des systèmes de protection en fonction de l'évolution des installations clients raccordées.	Après preuve de concept en TURPE 6, démonstration terrain d'un système de contrôle-commande virtualisé multifournisseurs (accomplissement des TRL 5, 6 et 7) et analyse des conditions technico-économiques pour la réussite du passage en industrialisation fin TURPE 7	Programme « Futurs Cyber-physiques et Eco-conçus des Infrastructures du Réseau » / Feuille de route « Virtualisation du contrôle-commande »

Technologies à courant continu (HVDC) interopérables entre elles et avec le réseau à courant alternatif

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
Favoriser, par la collaboration en R&D, l'émergence de technologies à courant continu (HVDC) interopérables entre elles et avec le réseau à courant alternatif, permettant le maillage pour une mutualisation optimisée des raccordements et une meilleure intégration dans le réseau existant.	Aboutissement du projet interOPERA (démonstration de la plateforme de simulation pour tester l'interopérabilité de répliques, <i>i.e.</i> accomplissement du TRL 7), portage des résultats en normalisation, expérimentation de nouveaux types de convertisseurs sur la plateforme ; étude de stabilité des réseaux hybrides maillés HVAC/HVDC, notamment en présence de convertisseurs fonctionnant en mode grid-forming.	Programme « Tension, protection, stabilité » / Feuille de route « Electronique de puissance et courant continu »

Notes : Ces travaux bénéficient de leviers de collaboration et de financements institutionnels dans le cadre du projet Horizon Europe interOPERA.

Nouvelles technologies lignes et postes

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
- Poursuivre/renforcer l'implication dans les groupes de travail de normalisation relatifs à la performance, à l'interopérabilité et à l'éco-conception des matériels électriques de réseau de manière à favoriser l'émergence de produits qualifiés et conformes aux réglementations qui répondent au mieux aux besoins futurs du Réseau Public de Transport. - Maintenir une activité minimale de veille, d'étude amont puis de qualification de nouvelles technologies de lignes et postes de transport d'électricité terrestre permettant des gains de productivité et de temps de mise en œuvre.	Activité récurrente d'étude et portage en normalisation des enjeux relatifs à la performance, à l'interopérabilité et à l'écoconception des matériels électriques de réseau terrestre.	Programme « Gestion des Actifs » / Feuille de route « Modéliser, expertiser, prédire le comportement des actifs » Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Normalisation »

Acceptation du réseau		
Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
► Appréhender les ressorts des relations de la société à l'énergie et au réseau pour identifier les facteurs propices à l'acceptation des infrastructures de RTE (notamment aériennes et maritimes) et d'expérimenter des pratiques nouvelles (ex : démarche paysagère, aménagements favorables à la biodiversité).	Accomplissement d'études exploratoires identifiant les facteurs de biodiversité et de relations à la société propices à l'acceptation des infrastructures terrestres aériennes et maritimes.	Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Énergie, réseau et société » Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Lignes Régénératives »

A4. Explorer et confirmer des choix de design pour le raccordement de l'éolien offshore en grande profondeur

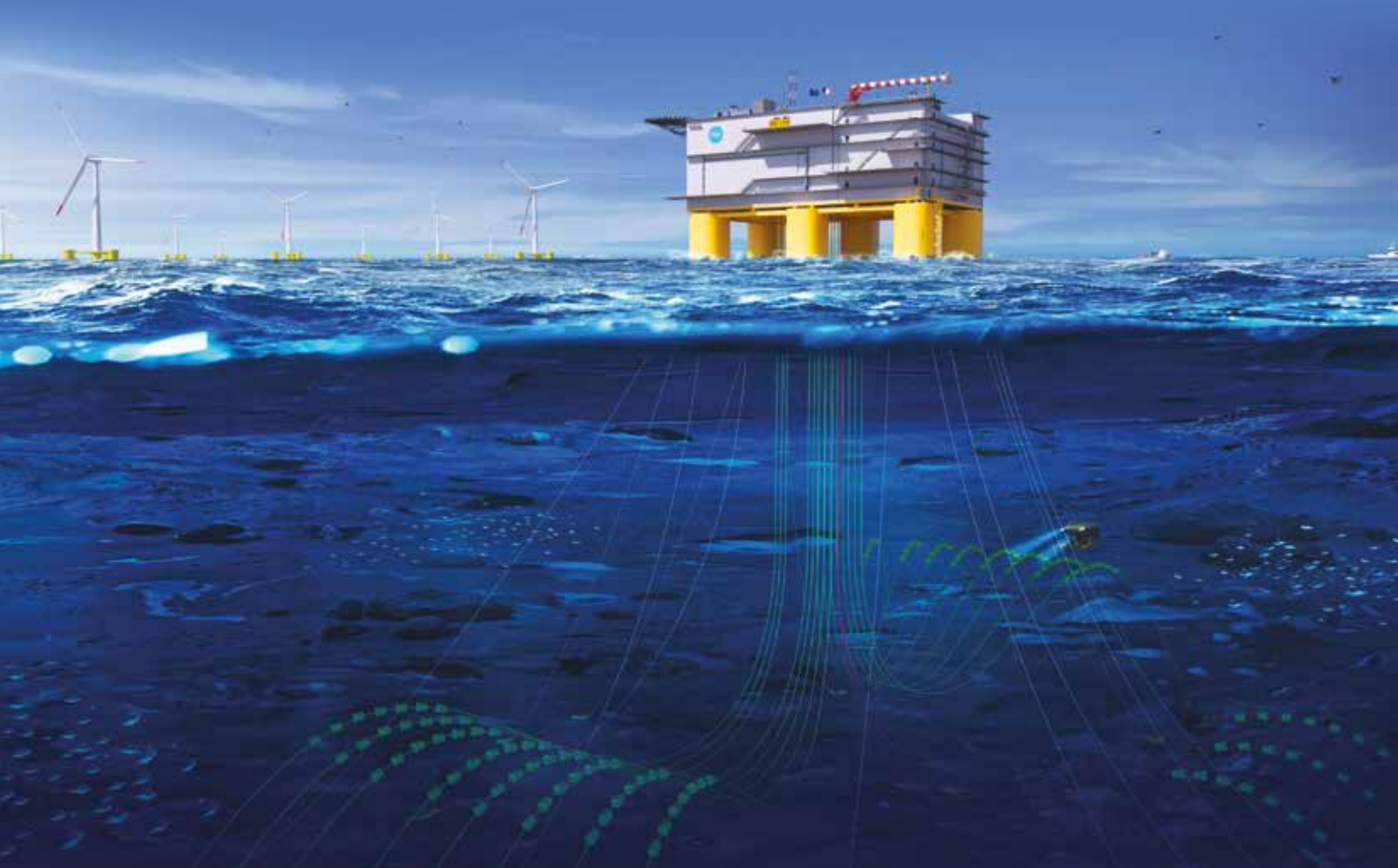
Le projet de stratégie française pour l'énergie et le climat affiche un objectif de 45 GW pour l'éolien en mer en 2050. Cet objectif est situé au milieu des scénarios étudiés dans les *Futurs énergétiques 2050*.

Pour préciser les zones de développement des futurs parcs en amont de la PPE 3, un débat public s'est tenu sur les quatre façades maritimes de la France métropolitaine, du 20 novembre 2023 au 26 avril 2024, sous l'égide de la Commission nationale du débat public (CNDP), pour évoquer les questions relatives à l'avenir de la mer, du littoral, de la biodiversité marine et de l'éolien en mer. Il visait notamment à planifier les zones de projet prioritaires devant être attribuées dans le cadre de la PPE 3, ainsi que de pré-identifier des zones, potentiellement plus larges, pour les projets à plus long terme (entre 2040 et 2050). Au moins trois zones maritimes identifiées sont situées à des profondeurs dépassant les 100 mètres de profondeur et pourraient ainsi être concernées par des raccordements à l'aide de postes flottants et de câbles dynamiques.

Pour mémoire, à la suite des débats publics qui ont eu lieu en 2020 et 2021 et qui ont révélé une forte préoccupation du public vis-à-vis de l'impact paysager des futurs parcs éoliens en mer, la décision a été prise de localiser les parcs éoliens en mer des phases AO4 et AO5 à plus de 40-50km des côtes.

La volonté d'éloignement des parcs, combinée à un enjeu de massification des raccordements face à la dynamique de croissance de l'éolien en mer attendue d'ici 2050, incite à privilégier des solutions de raccordement à courant continu (HVDC) de grande capacité (1 à 2 GW) qui présentent un meilleur coût pour la collectivité. En outre, la profondeur rapidement croissante des fonds marins dans la plupart des zones propices identifiées implique le recours à des structures flottantes au regard de l'état des connaissances actuelles et prospectives sur les techniques de construction de plateformes offshore.

Le coût de raccordement de 6 à 8 gigawatts d'éolien en mer en technologie HVDC sur plateforme flottante pourrait, selon des estima-



tions prospectives, représenter un coût d'investissement d'une dizaine de milliards d'euros.

Or, ce design d'infrastructures de raccordement en courant continu flottantes n'a jamais été mis en œuvre à ce jour. Il comporte des risques de faisabilité technique et de durabilité opérationnelle qui doivent faire l'objet d'études approfondies. Les incertitudes concernent 3 composantes majeures de telles installations :

- ▶ Les convertisseurs HVDC, soumis aux mouvements d'oscillations et de chocs des plateformes (et phénomènes mécaniques qui en découlent).
- ▶ Les équipements de transport à courant alternatif (PSEM, transformateurs), soumis aux mouvements d'oscillations et de chocs des plateformes (et phénomènes mécaniques qui en découlent).
- ▶ Les câbles « dynamiques » raccordant les plateformes (mobiles au gré des marées, vagues, vents et courants) aux câbles sous-marins classiques (ancrés au fond marin).

Outre la levée des précédents verrous techniques, l'enjeu sera aussi, au moyen de démarches collaboratives, de promouvoir le développement de filières industrielles nécessaires à la réalisation de tels projets et à la maintenance des installations.

En outre, des technologies de raccordement alternatives pourraient se développer durant la prochaine décennie. Par exemple, le raccordement par postes posés en grande profondeur pourrait constituer une alternative au flottant. Ou encore, avec un niveau de maturité aujourd'hui faible, l'émergence de câbles supraconducteurs sous-marins de grande distance permettrait le transport d'une puissance électrique considérable sur un nombre limité de conducteurs, tout en évitant le recours à des stations HVDC coûteuses et complexes à entretenir en mer.

Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif «A4» par des travaux dans deux domaines :

Projet RHODE (projet ADEME/France 2030) : cerner et lever les verrous technologiques du raccordement flottant (flotteurs, câbles dynamiques, électronique de puissance embarquée)

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Faire la synthèse des études théoriques engagées sur la période TURPE 6 (notamment «AFOSS DC») pour modéliser les phénomènes auxquels seront soumis les flotteurs, les câbles dynamiques et l'électronique de puissance embarquée et étudier leur comportement théorique dans la durée. ▶ Spécifier et réaliser une expérimentation en bassin pour confirmer le comportement dynamique des flotteurs et valider les résultats d'études papier précédentes. ▶ Tester, à terre mais en simulant physiquement les conditions de mer d'une plateforme flottante (tables vibrantes), certains équipements électriques sensibles pour vérifier que leur adaptation au milieu maritime flottant est possible (câbles dynamiques, équipements HVDC embarqués), dans le but d'affiner les choix de design, de bénéficier de premiers retours d'expérience avant de s'engager dans des infrastructures de grandeur réelle, en vérifiant notamment que celles-ci seront opérables dans la durée (opérations de maintenance, remplacement de composants).^(*) ▶ Proposer des orientations industrielles pour raccordement de l'éolien offshore nécessitant la mise en œuvre de plateformes électriques flottantes, au regard des enseignements des études et expérimentations réalisées, de l'évaluation technico-économique des options considérées et de l'appréciation des risques technologiques résiduels.	Accomplissement des TRL 3, 4, 5 (avec l'objectif de conforter les conditions de faisabilité technique et de durabilité opérationnelle avant 2029).	Programme « Futurs Cyber-physiques et Eco-conçus des Infrastructures du Réseau » / Feuille de route « Maritime »

Notes : Ces travaux devraient être réalisés, pour une grande part, dans le cadre d'un consortium candidat à un financement France 2030.

* Des tests en mer à l'aide de bouées sont aussi envisagées pour étudier le comportement de câbles dynamiques. Ces tests seront confirmés en fonction des budgets et du soutien des pays européens contribuant à cet effort de recherche.

Études complémentaires et de synthèse pour le raccordement de l'éolien en grande profondeur

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Réaliser l'étude technico-économique de postes posés en profondeur d'une centaine de mètres comme alternative au raccordement flottant. ▶ Assurer une veille sur les technologies de raccordement offshore à câbles alternatifs supraconducteurs. ▶ Contribuer à l'étude et la démonstration d'une solution innovante d'atténuation des pollutions sonores créées lors des travaux (battage/ forage pour les pieux de fondation et fixation des ancres). ▶ Proposer des orientations industrielles pour raccordement de l'éolien offshore sur des fonds marins dépassant une centaine de mètres, au regard des enseignements des projets précédemment décrits, d'études et veilles technico-économiques complémentaires, de l'évaluation technico-économique des options considérées et de l'appréciation des risques technologiques résiduels.	Après une phase d'exploration et de montage de projet en TURPE 6, réduction au strict minimum des activités exploratoires (veille technologique, construction de partenariats, études papier) ; production d'un rapport de synthèse.	Programme « Futurs Cyber-physiques et Eco-conçus des Infrastructures du Réseau » / Feuille de route « Maritime »

2.3 Concourir à la transformation du fonctionnement et de l'exploitation du système électrique

Trois objectifs de R&D devront guider la feuille de route R&D en TURPE 7 pour concourir à la bonne adaptation des processus et dispositifs assurant le fonctionnement opérationnel du système électrique et garantissant la continuité de l'alimentation et la qualité de l'électricité :

- B1.** Soutenir la performance opérationnelle de la conduite du système électrique par les outils d'aide à la décision et l'automatisation
- B2.** Préserver la sûreté de fonctionnement

du système : transformation des dispositifs nécessaires au maintien de la stabilité et de la qualité de l'électricité du réseau face à l'expansion de la production décentralisée, de nouveaux types de consommations et d'interfaces de conversion à électronique de puissance

- B3.** Faciliter l'équilibre du système par la modulation structurelle des usages, les services de flexibilité et la rénovation des dispositifs de sauvegarde

B1. Soutenir la performance opérationnelle de la conduite du système électrique par les outils d'aide à la décision et l'automatisation

Les principes de fonctionnement du système électrique se complexifient, avec des incertitudes sur les injections en forte croissance, des transits de variabilité accrue, aussi bien au niveau local que pan-européen, des interactions plus complexes avec les réseaux de distribution, une introduction massive d'interfaces de conversion à électronique de puissance (pour la connexion au réseau de sites de production, de consommation et de lignes HVDC) dont les comportements sont moins « linéaires » que les composants traditionnels du réseau et qui ne procurent pas intrinsèquement les effets stabilisateurs et autorégulateurs de ceux-ci (inertie mécanique des alternateurs, sensibilité de la charge à la tension et à la fréquence).

En parallèle, l'architecture de contrôle du réseau évolue pour intégrer davantage d'automatismes distribués dans le système, avec pour double finalité d'accroître les capacités du réseau à accueillir de nouveaux usages et de tirer parti d'une automatisation avancée pour gérer une part des aléas opérationnels, notamment aux très courtes échéances temporelles.

Les opérateurs des Centres Opérationnels du Système Électrique (COSE) sont ainsi confrontés à un « système de systèmes cyber-physiques » de complexité croissante. Compte-tenu des conséquences en cas d'incidents de grande ampleur, les procédures de conduite du réseau adoptent, en règle générale, un principe de précaution face à des complexités non maîtrisées : des marges de sécurité opérationnelle doivent être prises pour contenir le risque d'une évolution non maîtrisée du réseau. Par ailleurs, les erreurs d'appréciation de la situation réelle du réseau peuvent conduire à des décisions sous-optimales ou contreproductives (contractualisation de services système ou d'ajustement non nécessaires...).

Pour permettre aux opérateurs de mieux appréhender la complexité croissante du système et modérer ainsi les marges de sécurité opérationnelles requises, il est nécessaire d'outiller les salles de conduite du système électrique, en y intégrant de nouveaux moyens d'hypervision et d'aide à la décision (assistants intelligents, outils d'étude et de

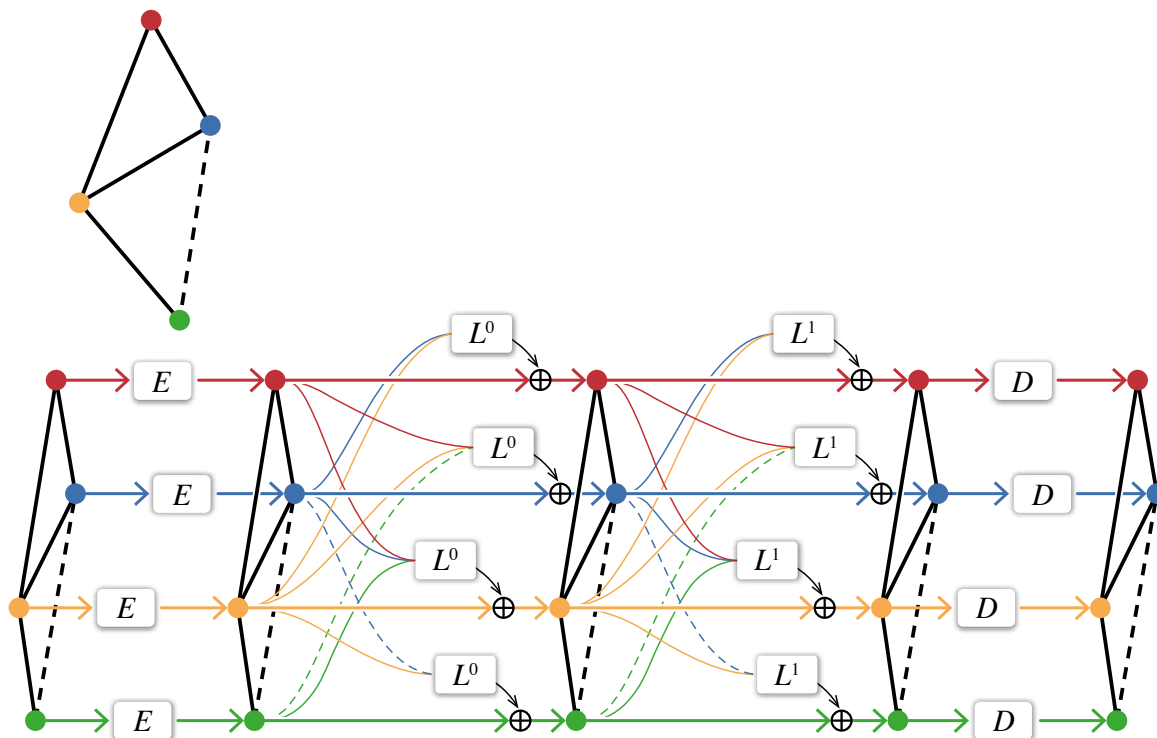


FIGURE Graph Neural Networks pour la conduite du réseau

simulation divers) qui facilitent l'identification et la mise en œuvre des meilleures trajectoires de conduite du système, tenant compte à la fois des critères de stabilité de fonctionnement et de qualité d'électricité, des incertitudes aux diverses échéances temporelles et des leviers d'actions curatives disponibles. Par exemple, des algorithmes d'analyse de sécurité employant des méthodes d'optimisation sous incertitudes peuvent apporter une aide précieuse pour déterminer les capacités de transit disponibles en présence d'incertitudes sur les injections et les soutirages mais aussi de leviers (modification de la topologie du réseau ou de prises de transformateurs déphaseurs, modulations d'injections...) pour faire face aux aléas.

L'enjeu est conséquent puisque les projections du SDDR montrent une croissance des coûts de congestions résiduelles qui pourraient atteindre un ordre de grandeur de plusieurs centaines de millions d'euros par an entre 2030 et 2040 (autour de 450 M€/an en 2035 dans un scénario cohérent avec le projet de PPE 3, soit 4 à 5 fois plus qu'actuellement). En disposant d'outillages qui permettent de réduire de 5 % à 10 % le volume de congestion par une modération des marges de sécurité opérationnelle requises, les gains pourraient représenter entre 20 M€ et 50 M€ par an.

En outre, des systèmes de qualification et de coordination opérationnelle des automatismes distribués dans le système s'avèrent nécessaires pour assurer la cohérence d'ensemble et éviter que des actions locales d'automates ne génèrent des coûts opérationnels additionnels du fait d'actions discordantes.

Par exemple, des résultats préliminaires d'études réalisées dans le cadre du SDDR révèlent qu'au-delà des bénéfices apportés par les solutions NAZA existantes, environ 2 à 3 milliards d'euros d'investissements en infrastructures de réseau pourraient être évités à 2040, à condition de disposer de solutions d'aide à la gestion en temps-réel des congestions générées sur les réseaux de tension HTB2 notamment par la croissance de la production renouvelable. A priori, de telles solutions ne consisteraient pas seulement en de nouveaux systèmes d'automates développés dans le cadre de l'objectif A4, mais aussi en des outils permettant aux opérateurs des COSE d'analyser promptement l'évolution de la situation opérationnelle pour prendre les décisions appropriées en tenant compte des effets des automatismes distribués.

Tout ce futur outillage comporte toutefois un inconvénient : sa complexité s'annonce également accrue en comparaison avec les outils

traditionnels pour la conduite du réseau. Par conséquent, un facteur de réussite critique sera la capacité à maîtriser cette double complexité (complexité du système électrique et des outils pour le piloter) à différents stades, depuis le maquettage, la validation, le déploiement des outils, jusqu'à la formation des opérateurs et à la vérification que la conduite de systèmes reste maîtrisée face à divers événements et scénarios plausibles.

Les enjeux de cette maîtrise sont multiples. La bonne prise en main de l'outillage par les opérateurs sera essentielle pour en tirer les bénéfices attendus voire ne pas dégrader la performance opérationnelle par de mauvaises interprétations de l'information. Cet outillage étant construit et amélioré progressivement, de manière incrémentale, il faudra être en capacité à expérimenter, valider puis insérer rapidement un nouveau composant parmi une palette d'outils existants. Enfin, la dynamique et l'ampleur de transformation du système électrique attendues sont telles qu'il deviendra plus difficile pour un opérateur de s'appuyer sur l'expérience passée et sur l'apprentissage « sur le

tas ». Ainsi, en sus des méthodes et outils mis en œuvre dans un contexte opérationnel, RTE est confronté au besoin croissant de disposer d'un « laboratoire de la conduite du système électrique » pour accélérer le déploiement des solutions et assurer la formation des opérateurs et qui réponde à 3 finalités :

- ▶ de plateforme d'expérimentation et de preuve-de-concept R&D, pour tester l'intégration système d'outils prototypes pour la salle de conduite, et ainsi « designer » les nouvelles gammes d'outils d'aide à la décision en veillant à la cohérence, la fluidité, l'ergonomie et la fiabilité des interactions entre l'opérateur et les multiples assistants ;
- ▶ d'environnement de démonstration sous contrôle, pour tester et valider les nouveaux outils avant mise en œuvre industrielle, en combinaison avec la palette d'outils opérationnels existants ;
- ▶ d'infrastructure prototype pour élaborer et tester de nouvelles pratiques de formation des opérateurs, d'entraînement à réagir face à une diversité situations opérationnelles complexes et d'étude de scénarios d'incidents cyber-physiques.

Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « B1 » par des travaux dans cinq domaines :

Méthodes et outils de prévision court-terme des injections et soutirages

Consistance

- ▶ Concevoir, prototyper et expérimenter des améliorations de l'outillage de prévision des injections et soutirages pour l'adapter à l'évolution du mix production-consommation et aux besoins de finesse locale, avec un focus particulier sur l'intégration d'informations exogènes transmises par les parties prenantes, la modélisation des comportements de modulation en réponse à des signaux de marché (et autres comportements de flexibilité), l'amélioration de performances par des techniques d'hybridation entre modèles physiques et intelligence artificielle, ainsi que la caractérisation des incertitudes associées aux prévisions.

Accomplissements ambitionnés en TURPE 7

Accomplissement des TRL 5, 6, 7 pour un outillage minimum viable adapté au mix 2030.

« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition

Programme « Prévisions court-terme et EOD court-terme » / Feuille de route « Prévisions court-terme »

Méthodes et outils d'assistance pour la gestion de l'équilibre offre-demande

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Concevoir, prototyper et expérimenter des solutions d'aide à la gestion de l'équilibre offre-demande dans une fenêtre opérationnelle écourtée et tenant compte des capacités du réseau en présence d'incertitudes croissantes, avec un focus particulier la modélisation des risques/conséquences relatifs à l'équilibre offre-demande en 2030, l'étude et la simulation de stratégies d'équilibrage et d'incitation, l'aide à l'optimisation des réserves, la caractérisation des impacts des automates.	Accomplissement des TRL 4, 5, 6 pour des méthodes et outils minimums viables adaptés à 2030.	Programme « Prévisions court-terme et EOD court-terme » / Feuille de route « EOD court-terme »

Méthodes et outils d'analyse de sécurité et d'assistance pour la gestion des transits et tensions

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Concevoir, prototyper et expérimenter des nouvelles solutions d'analyse de la sécurité de fonctionnement du réseau et d'aide à la conduite, fondées sur l'état de l'art des techniques scientifiques⁵, permettant de modéliser les complexités de fonctionnement du réseau, les dynamiques temporelles, les incertitudes et les capacités d'actions curatives apportées par les différents leviers de flexibilité, et de proposer aux opérateurs des actions préventives nécessaires à la bonne conduite du réseau.	Accomplissement des TRL 4, 5, 6, et partiellement 7, pour des méthodes et outils minimums viables adaptés à 2030.	Programme « Pilotage du système » / Feuille de route « Pilotage des flux » Programme « Tension, protection, stabilité » / Feuille de route « Tension »
▶ Concevoir, prototyper et expérimenter des solutions d'intelligence artificielle pour focaliser l'attention et soulager la charge des opérateurs (hyper-vision, aide à l'automatisation, alarmes complexes et éléments explicatifs).	Accomplissement des TRL 4, 5, 6, 7 pour des méthodes et outils minimums viables adaptés à 2030.	Programme « Pilotage du système » / Feuille de route « Smart Cockpit Interactif »

5. Simulation numérique, intelligence artificielle, optimisation robuste, hybridation de méthodes d'optimisation et d'apprentissage automatique (machine-learning)...

Coordination et optimisation des systèmes d'automates

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
Élaborer une architecture d'ensemble et concevoir un système d'orchestration qui intègre les différents modules d'aide à la décision et automatismes distribués de façon cohérente, coordonnée, robuste et efficace pour produire des capacités de pilotage du système électrique conformes aux exigences de performance et de sûreté de fonctionnement.	Accomplissement des TRL 4, 5, 6 pour permettre une industrialisation vers 2030.	Programme « Pilotage du système » / Feuille de route « Pilotage des flux » Programme « Futurs Cyber-physiques et Eco-conçus des Infrastructures du Réseau » / Feuille de route « Architecture de pilotage du système hybride cyber-physique » Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Stratégie trans-programme des outils d'aide à la décision »

Laboratoire de la conduite du système électrique

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
- Assembler un environnement opérateur expérimental et significatif, incluant les interfaces homme-machine de la salle de conduite et les assistants et outils d'aide à la décision employés pour la conduite du système, y compris des nouveaux outils et interfaces à expérimenter ou valider. - Développer, notamment dans le cadre du projet Horizon Europe TwinEU, un « jumeau numérique », c'est-à-dire d'un simulateur du système cyber-physique permettant d'en imiter le comportement dans son ensemble, en modélisant les composants électrotechniques du réseau électrique, les automates, régulations et protections, les systèmes de contrôle-commande, les réseaux de télécommunications... - Concevoir un « maître du jeu » pour générer des scénarios, animer le jumeau numérique selon ces scénarios et en tenant compte des interactions avec l'opérateur, et produire des indicateurs d'évaluation de la bonne conduite du système.	Accomplissement des TRL 4, 5, 6, répondant au besoin de plateforme d'expérimentation et de preuve-de-concept R&D dès 2028 et permettant une industrialisation pour les besoins de formation vers 2030.	Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Stratégie trans-programme des outils d'aide à la décision » Programme « Pilotage du système » / Feuille de route « Pilotage des flux » Programme « Maîtrise et simulation de la stabilité du réseau » / « Simulateurs électrotechniques du fonctionnement du système »

Notes : ces travaux bénéficieront de leviers de collaboration et de financements institutionnels dans le cadre du projet Horizon Europe TwinEU.

N.B. : Compte-tenu de la multiplicité de cas d'usage et afin d'accroître les possibilités de capitalisation futures, les précédentes activités seront guidées par les préceptes suivants :

- mener des études d'opportunité afin d'évaluer, *a priori*, les bénéfices potentiels (économiques, environnementaux, opérationnels) et conditions de réussite de concepts d'automatisation et d'aide à la décision pour des cas d'usage à fort enjeu ;
- architecturer des solutions modulaires et évolutives pour les différents assistants évoqués, en s'appuyant sur les concepts de jumeau numérique, de standards, d'ontologies, d'hybridation entre modèles physiques et intelligence artificielle et de communs logiciels open source.

B2. Préserver la sûreté de fonctionnement du système : transformation des dispositifs nécessaires au maintien de la stabilité et de la qualité de l'électricité du réseau face à l'expansion de la production décentralisée, de nouveaux types de consommations et d'interfaces de conversion à électronique de puissance

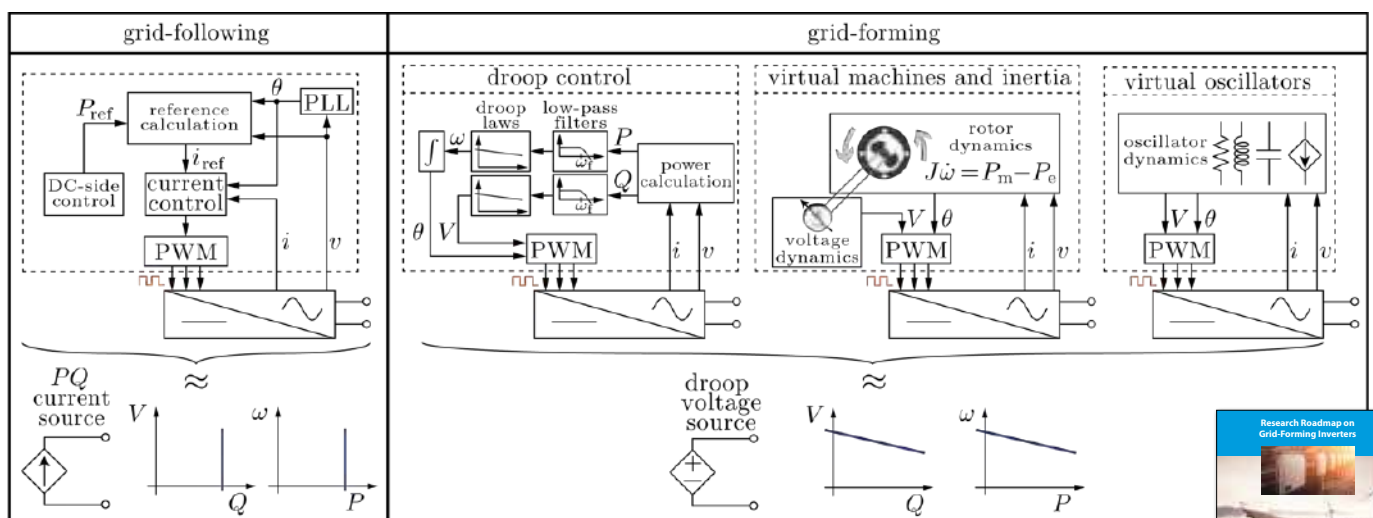
Les dispositifs permettant aujourd'hui d'assurer un fonctionnement stable du réseau avec une qualité de l'électricité élevée ont été conçus dans un contexte de production centralisée constituée de machines tournantes synchrones raccordées essentiellement aux réseaux à haute et très haute tension. Par exemple, la tension est maintenue en s'appuyant sur les centrales raccordées au RPT qui participent aux mécanismes de réglage de tension. Cette tension est ensuite répercutée sur les réseaux de répartition et de distribution par des dispositifs de réglage en charge et de compensation de puissance réactive. La croissance rapide de la production renouvelable décentralisée, raccordée aux réseaux de distribution et de répartition, bouleverse ces principes.

Par ailleurs, la dissémination massive de l'électronique de puissance dans le système, tant au niveau des productions, des consom-

mations, que des infrastructures de transport HVDC, modifie progressivement le comportement électrotechnique du réseau, compromettant à terme l'efficacité des dispositifs qui permettent aujourd'hui d'en assurer le bon fonctionnement et la sûreté (stabilité dynamique, plans de protections et de défense, respect des critères de qualité de l'électricité et notamment de qualité de la tension).

Le développement de nouveaux usages interfacés au réseau par des convertisseurs à électronique de puissance, tels que les stations de recharge de véhicules électriques, les centres informatiques (*cloud computing*) et les filières industrielles décarbonées (électrolyseurs notamment), accentue ces bouleversements et interroge l'adéquation des prescriptions de raccordement et autres dispositifs réglementaires et normatifs pour ces nouveaux types de clients consommateurs.

FIGURE Functional diagrams of grid-following and grid-forming inverters. Grid-following inverters mimic current sources at their output terminals, Whereas grid-forming inverters act like voltage sources whose output abides by droop laws.



Source : Research Roadmap on Grid-Forming Inverters.



En outre, la multiplication d'infrastructures HVDC induite par le développement des interconnexions et de l'éolien offshore conduit à une hybridation AC/DC progressive du maillage du réseau de transport, avec des caractéristiques radicalement différentes de ces deux catégories d'actifs (comportement électrotechnique et manœuvrabilité).

Enfin, les transformations précédentes affectent en particulier le fonctionnement des réseaux de distributions et impliquent de repenser l'interface entre RPT et RPD pour une gestion cohérente et coordonnée des services système.

Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « B2 » par des travaux dans cinq domaines :

Compréhension des phénomènes et modélisation		
Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Élaborer une compréhension consolidée des impacts d'une dissémination massive de convertisseurs à électronique de puissance et de contrôles-commande numériques (automatismes) sur le comportement électrotechnique des réseaux, en analysant l'ensemble des dispositifs qui assurent les fondations du système électrique (stabilité dynamique, plans de protections et de défense, respect des critères de qualité de l'électricité et notamment de qualité de la tension). ▶ Élaborer des modèles numériques des convertisseurs de puissance et contrôles-commande numériques appropriés pour les simulateurs du système électrique, en tenant notamment compte d'une plus grande diversité dans les principes physiques et logiques régissant le comportement de ces nouveaux équipements (en comparaison avec les charges et machines synchrones traditionnelles). ▶ Améliorer / inventer la prise en compte de ces phénomènes système dans les méthodes et outils pour les études réseau (des études de développement d'infrastructures jusqu'aux études de stratégies d'exploitation) afin de pouvoir anticiper les adaptations de dispositifs.	Amélioration incrémentale des méthodes et outils depuis la formulation de nouveaux phénomènes jusqu'au prototypage puis à l'expérimentation en grandeur réelle (TRL 2 à 7). Réalisation d'études tête de série.	Programme « Maîtrise et simulation de la stabilité du réseau » / « Stabilité d'un système en forte mutation » Programme « Maîtrise et simulation de la stabilité du réseau » / « Simulateurs électrotechniques du fonctionnement du système » Programme « Tension, protection, stabilité » / Feuille de route « Protections »

Analyse et adaptation de l'architecture de pilotage

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
► Identifier et réaliser les adaptations de l'architecture de pilotage du système pour préserver le bon fonctionnement électrotechnique du système (stabilité dynamique, plans de protections et de défense, respect des critères de qualité de l'électricité).		Programme « Futurs Cyber-physiques et Eco-conçus des Infrastructures du Réseau » / Feuille de route « Architecture de pilotage du système hybride cyber-physique » Programme « Tension, protection, stabilité » / Feuille de route « Tension » Programme « Tension, protection, stabilité » / Feuille de route « Protections »

Observabilité du comportement dynamique

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
► Etudier les besoins d'amélioration de l'observabilité du comportement dynamique du réseau au moyen de dispositifs de mesure de haute précision⁶, pour la compréhension et la maîtrise des nouveaux phénomènes d'instabilité, la validation des modèles de simulation et l'analyse a posteriori d'évènements d'instabilité. ► Elaborer puis expérimenter les méthodes et outils numériques de monitoring opérationnel et d'analyse a posteriori correspondants.	Accomplissement des TRL 4, 5, 6.	Programme « Maîtrise et simulation de la stabilité du réseau » / « Stabilité d'un système en forte mutation »

6. Dispositifs tels que des PMU (Phasor Measurement Units) permettant de mesurer les amplitudes et phases des tensions et courants avec un échantillonnage fin de l'ordre de quelques millisecondes. Ces mesures sont synchronisées de manière très fine, la plupart du temps par horloge GPS, ce qui est fondamental pour des activités telles que le retour d'expérience ou l'analyse des modes d'oscillation du système électrique.

Spécification des services système des convertisseurs (grid forming, tension)

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Explorer, en s'appuyant sur des analyses technico-économiques, des ajustements réglementaires ou normatifs qui contribueraient de manière efficace à la préservation de la sûreté de fonctionnement du système (prescription, par exemple, de dispositifs agissant en « grid-forming »).	Accomplissement des études et expérimentations permettant de préciser et justifier les caractéristiques des services système (dont grid forming) à exiger des convertisseurs à l'horizon 2030.	Programme « Maîtrise et simulation de la stabilité du réseau » / « Stabilité d'un système en forte mutation » Programme « Tension, protection, stabilité » / Feuille de route « Electronique de puissance et courant continu »

Expérimentation coordination tension à l'interface GRT-GRD

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Designer, prototyper et expérimenter en environnement opérationnel, en collaboration avec des GRD, les mécanismes de gestion cohérente et coordonnées des services système à l'interface entre RPT et RPD.	Dans le cadre d'une collaboration RTE-Gérédis, démontrer par une étude technico-économique les gains opérationnels d'une gestion dynamique coordonnée de consignes de réactif mettant en œuvre différents leviers (sites de production, équipements STATCOM dans les postes source), et en valider les résultats et la faisabilité par une démonstration en environnement d'essai voire opérationnel (accomplissement des TRL 4,5,6).	Programme « Tension, protection, stabilité » / Feuille de route « Tension »

Notes : la réalisation d'un démonstrateur en grandeur réelle nécessitera vraisemblablement des financements complémentaires à la régulation incitative de la R&D dans le cadre du TURPE. Les plans de financement correspondants seront définis dans le cadre des études préalables mentionnées.

B3. Faciliter l'équilibre du système par la modulation structurelle des usages, les services de flexibilité et la rénovation des dispositifs de sauvegarde

Comme exposé dans le Bilan prévisionnel 2023, les engagements français et européen de décarbonation massive d'usages énergétiques (transports, industrie), en réponse au défi climatique, combinés à des enjeux économiques stratégiques de réindustrialisation et de développement du secteur numérique impliquent de se préparer à une croissance significative des usages électriques. Dans le même temps, le développement des moyens de production pour faire face à ces nouveaux usages est confronté à des défis ardu (technologiques, d'acceptabilité, de financement, de capacité industrielle). Un levier essentiel pour atténuer d'éventuelles tensions récurrentes d'équilibre offre-demande dans un scénario défavorable de mauvaise disponibilité de production sera la capacité à moduler massivement les usages.

Ainsi, le Bilan prévisionnel 2023 présente différents bouquets de flexibilité possibles dont, par exemple, une trajectoire médiane qui consisterait à assurer en 2035 que 15 millions de consommateurs disposent d'offres tarifaires valorisant la flexibilité des usages, 300 000 bâtiments de plus de 1 000 m² soient équipés d'installations de gestion technique (GTB), 12 à 27 millions de bornes de recharges permettent le pilotage de la charge et que la capacité d'effacements industriels augmente à 4 GW.

Pour cela, le système électrique français futur devra intégrer, à l'horizon d'une dizaine d'années, des dispositifs permettant la modulation massive, fiable et générique d'usages électriques. Par modulation d'usages, on entend notamment la capacité à modifier des comportements de consommation et de production locale, que ce soit façon régulière, dans une logique d'incitation tarifaire structurelle ou d'optimisation énergétique automatique, ou sous la forme de services de flexibilité dynamiques, à la demande d'un acteur du marché ou d'un gestionnaire de réseau, afin de participer à l'optimisation d'un portefeuille de transactions sur le marché, à l'équilibrage offre-demande du réseau, ou à contribuer à la sauvegarde du système lors de situations de déséquilibre entre l'offre et la demande. Par

usages électriques, on englobe notamment les consommations résidentielles, tertiaires et industrielles (mobilité électrique incluse) et les productions d'électricité photovoltaïque résidentielles et tertiaires. Par « massive, fiable et générique », il s'agit de concevoir dispositifs permettant aux services de se développer rapidement, à l'échelle de centaines de milliers voire millions de sites, sans que leur gestion opérationnelle induise des complexités ou des coûts prohibitifs, en assurant une maîtrise du service rendu et sans omettre la prise en compte de l'exigence de cybersécurité associée.

Rétrospectivement, au cours des dernières décennies, le développement de services de flexibilité s'est avéré lent et laborieux. On peut même parler de déclin dans certains segments (résidentiel). La réalité terrain est donc en fort décalage avec les attentes, qu'il s'agisse de celles exprimées au niveau européen, au travers d'initiatives telles que la communication « Transition numérique du système énergétique » de la Commission Européenne, ou de celles révélées par la période de tension sur l'approvisionnement que la France a traversée en 2022-2023.

Un des freins au développement semble tenir à la fragmentation de l'écosystème. Cette fragmentation compromet les économies d'échelle requises pour que les gains unitaires deviennent significativement supérieurs aux coûts, complique les approches systématiques, et constitue un coût d'entrée pour le consommateur. Pour remédier à cette fragmentation, il faudrait un cadre d'interopérabilité qui permette le développement des systèmes de flexibilité de manière générique et robuste au changement de fournisseur d'électricité, au changement de site (résidentiel, tertiaire), au changement d'équipementier. En effet, le passage à l'échelle se fera difficilement avec des dispositifs « sur-mesure » nécessitant de multiples efforts (et coûts) d'adaptation tout au long du cycle de vie d'un site de consommation. Une simplicité comparable aux dispositifs historiques EJP, TEMPO ou de tarification jour/nuit devrait être recherchée.

En outre, l'incitation à la flexibilité pourrait émerger d'autres considérations que la seule optimisation de la facture électrique. La maîtrise de l'empreinte carbone semble une préoccupation croissante chez les consommateurs (entreprises et particuliers). La corrélation croissante entre les signaux de tensions sur l'équilibre offre-demande et d'intensité carbone du mix électrique, à mesure que la production carbonée se développe, incite à considérer d'autres leviers d'incitation que la seule optimisation tarifaire ou rémunération du service. Tout en étant caractérisés par la simplicité, les dispositifs devront être en capacité à s'articuler avec une diversité de préférence des consommateurs, de façon évolutive.

On observe également l'émergence de comportements guidés par des logiques d'optimisation locale (autoconsommation individuelle ou collective, « *vehicle-to-home* »), mettant en œuvre des dispositifs de gestion proactive des usages. Ces initiatives et les motivations qui les portent doivent être prises en compte et pourront opportunément apporter des enseignements, même si elles ne semblent pas en

l'état répondre aux conditions d'un développement de masse. Une conception systémique cohérente englobant, entre autres, l'état d'équilibre offre-demande, les vérités locales mesurées par les systèmes de comptage communicant, et les conditions contractuelles et transactionnelles relatives à la fourniture, paraît incontournable pour que la flexibilité/modulation des usages se développe massivement et efficacement pour la collectivité.

Une autre facette de cette thématique concerne la rénovation des dispositifs de sauvegarde de l'équilibre du système. Aujourd'hui, ces dispositifs reposent essentiellement sur un mécanisme de délestage consistant en des coupures de grappes de consommateurs par échelons. Ce mécanisme ne permet pas une discrimination des usages en fonction de leur valeur ou criticité (par exemple, une coupure d'alimentation peut affecter une antenne relais de télécommunications tandis qu'une consommation de chauffage de confort est maintenue). Cette faible capacité de discrimination rend le délestage peu acceptable pour les clients affectés. Une évolution, par exemple,

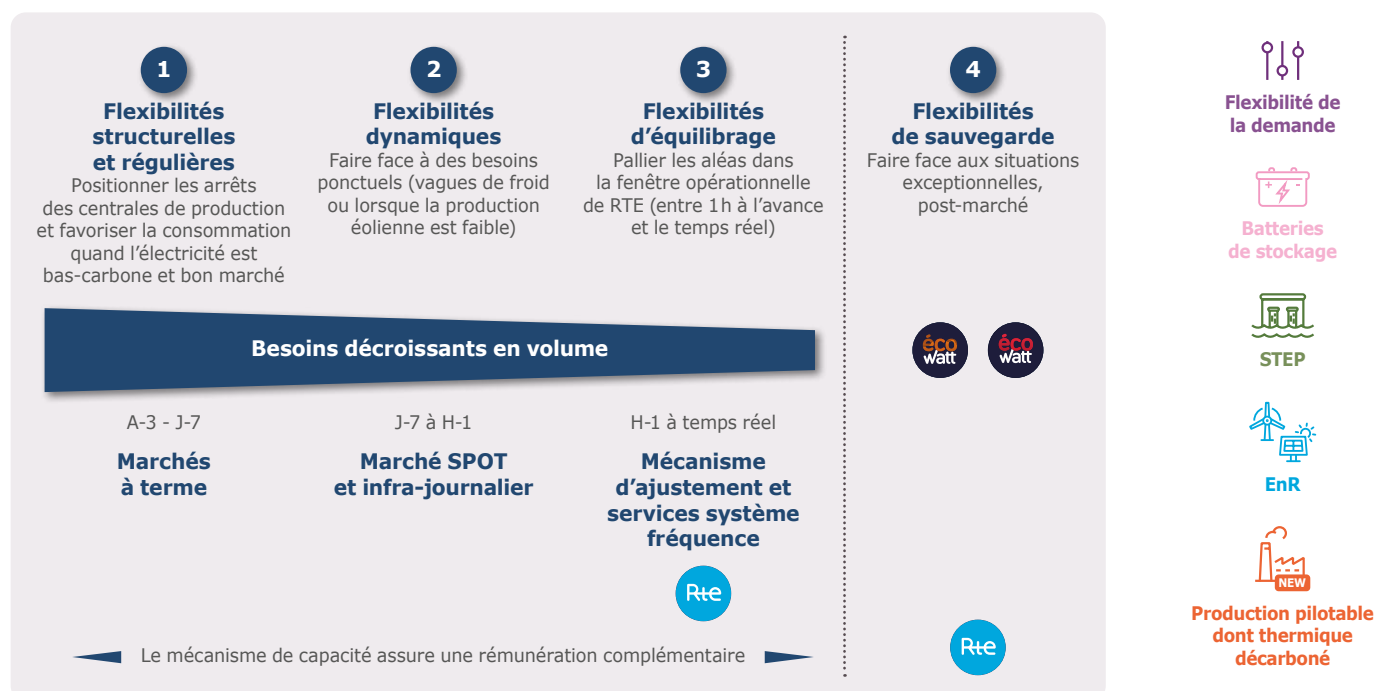


FIGURE Différents types de flexibilités pour des besoins relatifs à l'équilibre offre-demande

vers des dispositifs de limitation de puissance consommée couplés à des dispositifs de modulation d'usages en aval du compteur permettrait, à profondeur de coupure équivalente, de réduire le « coût » perçu du délestage par la collectivité, en incitant une assiette plus grande de consommateurs à renoncer à leurs usages électriques les moins essentiels.

Enfin, la dimension multi-services implique des couplages et interdépendances entre les processus du GRT, des GRD, des acteurs du marché et des nouveaux acteurs diffus comme les communautés d'énergie, nécessi-

tant un modèle de coordination opérationnelle et transactionnelle. Par exemple, un site de flexibilité peut être sollicité au même moment pour équilibrer le portefeuille d'un acteur de marché, pour résoudre une contrainte de transit sur le réseau de transport et pour maintenir la tension sur le réseau de distribution. Quelles sont les règles de préséance technico-économiques pour arbitrer entre ces services et de filtrage pour éviter que les activations ne génèrent des contraintes techniques collatérales ? Comment l'information associée doit-elle être coordonnée entre les acteurs ?

Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « B3 » par des travaux dans quatre domaines :

Études des besoins et valeur des flexibilités		
Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Affiner les modèles d'étude des besoins et de valorisation des flexibilités, en tenant compte des nouveaux modes de gestion de l'équilibre offre-demande et des contraintes de décision sous incertitudes. ▶ Comprendre et modéliser les interactions entre les mécaniques de flexibilité guidées par l'équilibre offre-demande et la gestion des contraintes de transits du réseau ; analyser les conditions d'un développement des flexibilités favorable à la gestion du réseau.	Maquettage et démonstration de briques de modélisation permettant une représentation améliorée des flexibilités dans les outils d'étude prospective à l'horizon 2030 (accomplissement des TRL 4, 5, 6).	Programme « Prévisions court-terme et EOD court-terme » / Feuille de route « EOD court-terme »

Notes : les concepts et modélisations développés dans le cadre de l'activité « Méthodes et outils d'assistance pour la gestion de l'équilibre offre demande » contribueront également à cette activité.

Connaissance des capacités des flexibilités d'usages électriques et conditions de leur développement

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Affiner la connaissance des usages électriques diffus et leurs capacités de modulation face à différents signaux (tarifaires, pédagogiques, en situation de délestage) et compte-tenu des délais de mise en œuvre requis. ▶ Identifier les principaux facteurs de motivation pour la modulation des usages et la fourniture de services de flexibilité et de quantifier les niveaux d'incitation et de simplicité requis pour une adoption en masse. ▶ Identifier des composants d'interopérabilité mutualisés que les gestionnaires de réseau pourraient mettre en avant pour faciliter l'émergence de systèmes de pilotage des usages chez les consommateurs et l'émergence d'offres tarifaire appropriées chez les fournisseurs (signaux sur l'état prévisionnel du système, capacités de comptage « intelligent »). ▶ Étudier les conditions de développement de services de flexibilité dans le cadre ou en cohérence avec les contrats de fourniture par les acteurs de marché et la tarification des réseaux. ▶ Analyser l'effet des dispositifs réglementaires et tarifaires actuels sur l'incitation à la modulation/flexibilité et d'identifier les ajustements qui permettraient d'en accroître le potentiel.	Accomplir les preuves-de-concept des principales conditions de développement des flexibilités au moyen d'études et maquetages (TRL 3, 4, 5), voire portage dans l'activité « démonstrateurs » pour les TRL suivants (voir ci-après).	Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Flexibilité et régulation » Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Décarbonation, électrification et flexibilités de la consommation » Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Normalisation »

Évolution des dispositifs de sauvegarde EOD

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Esquisser puis élaborer et analyser des options de rénovation des dispositifs de sauvegarde de l'EOD (facteurs d'acceptation, composants d'interopérabilité à développer par les réseaux, cohérence avec la fourniture et les marchés, besoins d'ajustements réglementaires et tarifaires).	Accomplissement des TRL 2, 3, 4 (puis portage dans l'activité « démonstrateurs » pour les TRL suivants (voir ci-après).	Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Flexibilité et régulation »

Démonstrateurs de flexibilité des usages électriques

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
► Mener des expérimentations terrain (démonstrateurs) pour valider les conditions de réussite techniques, économiques, réglementaires et contractuelles, orienter l'émergence de dispositifs appropriés et en promouvoir la standardisation par la collaboration open source et la normalisation.	Suivi des démonstrateurs du projet PlaneTerr (stockage de chaleur et recharge de véhicules électriques) et analyse des enseignements. Dans le cadre du partenariat RTE-Gérédis, étude d'opportunité, définition du cahier des charges puis mise en œuvre le cas échéant d'un démonstrateur à l'échelle du territoire des Deux-Sèvres – Accomplissement des TRL 5 et 6 (pour un sous ensemble des dispositifs/services de flexibilité considérés)	Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Flexibilité et régulation » Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Décarbonation, électrification et flexibilités de la consommation » Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Normalisation »

Notes : la réalisation de ces démonstrateurs nécessitera vraisemblablement des financements complémentaires à la régulation incitative de la R&D dans le cadre du TURPE. Les plans de financement correspondants seront définis dans le cadre des études préalables mentionnées.

2.4 Anticiper et prendre en compte les facteurs de risque et de bouleversement exogènes majeurs

Trois objectifs de R&D devront guider la feuille de route R&D en TURPE 7 pour l'anticipation et la prise en compte des facteurs de risque et de bouleversement exogènes :

C1. Préparer l'adaptation du système et des infrastructures électriques au changement climatique

C2. Maîtriser les risques industriels et assurer la responsabilité sociétale de RTE par l'écoconception, la circularité et la préservation de l'environnement et de la biodiversité

C3. Anticiper les risques et opportunités par la prospective et la résilience aux incertitudes fortes, dans un contexte d'instabilités accrues

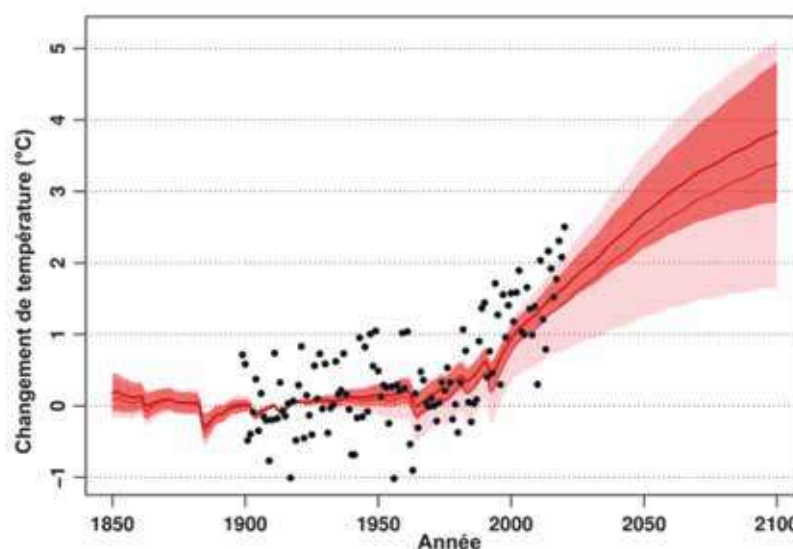
C1. Préparer l'adaptation du système et des infrastructures électriques au changement climatique

Début 2023, Météo-France annonçait dans son bilan climatique annuel⁷, « l'année 2022 a été l'année la plus chaude jamais enregistrée en France depuis le début du XX^e siècle ». Sur l'ensemble du globe, on estime qu'en 2022 la température moyenne mondiale a dépassé d'environ 1.15°C la moyenne préindustrielle (période 1850-1900) et, au rythme

actuel, la limite de +1.5°C en moyenne planétaire souhaitée par l'accord de Paris pourrait être atteinte non pas en fin de siècle mais en 2035⁸. Pour la France, la prise en compte des observations des dernières décennies conduit à un rehaussement significatif de la distribution possible des projections de température d'ici la fin du siècle :



FIGURE Anomalies de la température moyenne annuelle en France par rapport à la période 1900-1930 dans les modèles CMIP6, dans le cas du scénario SSP2-4.5. Voir Ribes *et al.*, 2022 – figure 5 – pour les détails. La prise en compte des observations fait passer de l'estimation rose (modèles sans contrainte) à l'estimation rouge (modèle avec contrainte).



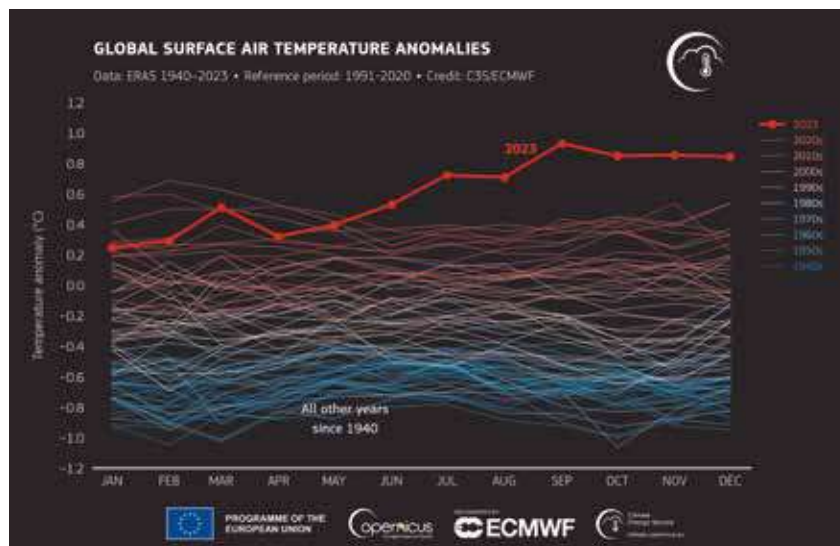
7. Cf. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/2022-annee-la-plus-chaude-en-france> et https://meteofrance.fr/sites/meteofrance.fr/files/files/editorial/Bilan_climatique_definitif_2022_130123_synthese_P1-23.pdf

8. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-c3s-global-temperature-trend-monitor?tab=app>

Plus récemment, le consortium Copernicus rapportait⁹ que l'année 2023 sortait à son tour des normes pour battre les records et approcher le seuil de réchauffement de 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels :

FIGURE Anomalies mensuelles de la température de l'air à la surface du globe (°C) par rapport à la période 1991-2020, de janvier 1940 à décembre 2023, représentées sous forme de séries chronologiques pour chaque année. L'année 2023 est représentée par une ligne rouge épaisse, tandis que les autres années sont représentées par des lignes fines et ombrées en fonction de la décennie, du bleu (années 1940) au rouge brique (années 2020).

Source des données : ERA5.
Crédit : C3S/ECMWF.



Ces projections, plus pessimistes d'année en année, renforcent la nécessité de préparer le système électrique français au changement climatique. Les enjeux sous-jacents sont multiples et affectent un large éventail des missions de RTE :

- ▶ Les conditions climatiques influent directement sur les températures d'échauffement des conducteurs aériens et souterrains et donc sur les transits maximums admissibles pour que la dilatation de ces conducteurs aériens ne pose pas de risque de proximité avec des personnes ou des biens ou que la surchauffe de ces câbles souterrains ne provoque pas de dégradation de l'isolant et donc de court-circuit.
- ▶ L'intensification des sécheresses, sur des périodes et zones géographiques plus étendues, accroîtra l'exposition de RTE au double risque de subir et de provoquer des incendies. D'une part, le risque d'incendie se traduit par un risque sur la sécurité d'alimentation électrique (mise hors service des lignes électriques). D'autre part, les défauts

sur les réseaux électriques provoquant des amorçages avec une végétation sèche peuvent être la cause de départs de feu aux conséquences catastrophiques, dont RTE pourrait être tenu pour responsable, comme l'a été PG&E en Californie.

- ▶ La hausse des températures de fonctionnement peut accélérer le vieillissement de certains équipements et accroître les fréquences de pannes. Certains équipements installés aujourd'hui devront pouvoir fonctionner dans les conditions climatiques de la fin de siècle.
- ▶ Des périodes de canicule plus intenses et fréquentes peuvent compromettre la capacité à réaliser des travaux de maintenance à certaines périodes ou nécessiter des ajustements organisationnels importants.
- ▶ L'évolution et l'intensification des risques d'inondation (ruissellement, débordement, coulées de boues, remontées de nappes phréatiques et submersion marine) menacent certaines infrastructures existantes et devront être prises en compte pour la localisation des nouvelles infrastructures.

9. <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023>

- ▶ Le changement climatique affectera directement certains usages énergétiques (climatisation, chauffage) et pourrait avoir des impacts plus profonds sur les modes de vie et l'organisation économique et sociale, impacts à anticiper dans les études prospectives de RTE.
- ▶ Des événements climatiques de forte intensité pourraient engendrer des modes communs d'incidents (par exemple la conjonction de canicule et sécheresse étendues pourraient induire simultanément une multiplication d'incendies nécessitant la mise hors service d'infrastructures, des problèmes de refroidissement de centrales et des pannes matérielles).

Dans ce contexte, RTE a été sollicité dans le cadre des travaux relatifs à la Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC), établissant pour scénario de référence environ +4 °C en moyenne sur la France métropolitaine. Le Plan national d'adaptation au change-

ment climatique (PNACC3) qui en découle, et auquel RTE doit se préparer, inclut un volet spécifique aux réseaux électriques prescrivant des mesures d'adaptation aux hausses de température et risques d'inondation précédemment évoqués ainsi qu'une mise à jour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur le système électrique.

Le SDDR 2025 comporte un volet « renouvellement/adaptation au changement climatique » qui constituera le plan d'adaptation des infrastructures du RPT au changement climatique, en accord avec la TRACC.

L'amélioration des connaissances du changement climatique et la conception de méthodes de modélisation et de quantification des conséquences représentent un enjeu de premier plan au vu d'une trajectoire d'investissement pour le renouvellement et l'adaptation au changement climatique évaluée dans le SDDR à 20 milliards d'euros d'ici 2040.

Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « C1 » par des travaux dans deux domaines :

Connaissance des manifestations du changement climatique

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Maintenir à l'état de l'art les représentations du changement climatique utilisées par RTE, en intégrant les progrès scientifiques et l'état des connaissances (y compris ce que la réalité climatique enseigne jour après jour), avec des approfondissements dans la compréhension des phénomènes de température des sols, d'inondations et d'événements combinés.	Veille scientifique – études analytiques d'impacts – appui d'expertise aux activités de R&D concernées pour les maquettages et expérimentations	Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Climat, météo et impacts sur le système électrique »

Modélisation et quantification des effets sur les capacités de transit et prise en compte dans les systèmes de gestion des actifs

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Modéliser des effets du réchauffement climatique sur les températures d'échauffement des matériels (lignes aériennes, souterraines, transformateurs) pour ensuite quantifier les impacts sur les capacités de transit des infrastructures du réseau admissibles au regard des risques de proximité ou d'usure prématurée. ▶ Caractériser et quantifier l'évolution du risque incendie et évaluer les besoins d'évolution des politiques et outils de gestion des proximités.	Accomplissement des TRL 3, 4, 5 pour des modélisations relatives aux conducteurs souterrains, aux équipements de postes, aux fondations de pylônes et à la caractérisation des risques d'incendie	Programme « Gestion des Actifs » / Feuille de route « Modéliser, expertiser, prédire le comportement des actifs »
▶ Élaborer des méthodes pour identifier les fragilités de dimensionnement technique des matériels et installations du réseau face au changement climatique et de soutenir des activités d'innovation favorisant l'émergence de nouvelles technologies adaptées. ▶ Enrichir les systèmes d'aide à la gestion des actifs avec des modèles d'impacts du climat sur l'usure prématurée des matériels et l'organisation des chantiers de maintenance ; études de valorisation des conséquences, de dimensionnement robuste, de comparaison de stratégies au vu de projections climatiques 2030-2050 et au-delà.	Accomplissement des TRL 3, 4, 5 pour un outil minimum viable de comparaison de stratégies à projections climatiques 2030-2050	Programme « Gestion des Actifs » / Feuille de route « Modéliser, expertiser, prédire le comportement des actifs »

C2. Maîtriser les risques industriels et assurer la responsabilité sociétale de RTE par l'écoconception, la circularité et la préservation de l'environnement et de la biodiversité

Le projet de transformation industrielle de RTE pourrait être compromis pas un risque de concurrence mondiale accrue pour l'accès aux matières et technologies nécessaires à la réalisation des systèmes énergétiques futurs. En effet, de récents signaux suggèrent que les filières d'approvisionnement, mondialisées, pourraient connaître des défaillances récurrentes sous l'effet cumulé d'une croissance massive de la demande (pour répondre aux besoins globaux de renouvellement d'infrastructures vieillissantes et de développement de nouvelles filières énergétiques décarbonées), de disponibilités critiques de matières premières¹⁰ et de tensions géopolitiques.

S'ajoute une tendance d'ores-et-déjà engagée de renforcement des exigences réglementaires relatives à l'éco-conception, dans le but de contraindre les acteurs économiques à prendre en compte les enjeux de protection de l'environnement et de la biodiversité, et de sobriété de consommation des ressources¹¹. Ce foisonnement réglementaire et normatif aura pour effet de pénaliser les pratiques industrielles moins vertueuses en s'appuyant notamment sur des reportings extra-financiers normalisés¹² et des incitations à orienter les financements au profit d'activités classées « durables ».

Dans ce contexte, la connaissance des besoins en matières et technologies sous-jacents aux scénarios de développement et de renouvellement du système électrique (et leurs criticités respectives), ainsi que la connaissance des impacts des activités de gestion du réseau sur l'environnement, sur les écosystèmes et sur la biodiversité, sont des informations essentielles à la maîtrise des risques exposés. En outre, l'émergence de modèles industriels guidés par des critères d'écoconception et fondés sur davantage de circularité, recyclabilité et réparabilité pourraient permettre d'amortir les effets des tensions d'approvisionnement, faciliter la conformité aux exigences régle-

mentaires et accroître l'attractivité industrielle locale en valorisant les gisements de matériaux recyclables.

La maîtrise de ces risques nécessitera en premier lieu de disposer de méthodes et outils pour anticiper les points de fragilité. Pour cela, il sera nécessaire de confronter de multiples connaissances :

1. la quantification des principaux impacts des activités de gestion du RPT sur l'environnement, la biodiversité, les écosystèmes et les dimensions sociales ;
2. une représentation consolidée des besoins en matières et technologies découlant des trajectoires prévisionnelles de développement, d'adaptation et de renouvellement des infrastructures de RTE, mais aussi des besoins tiers relatifs aux actifs de production, de stockage et aux usages de consommation (les investissements dans le réseau devront en effet se faire en cohérence avec le développement des usages clients du réseau),
3. une appréciation des risques de tensions entre l'offre et la demande à l'échelle planétaire, en tenant compte des stocks et capacités de transformation, de concurrence sur la demande avec d'autres secteurs économiques ou zones géographiques, de l'émergence de solutions de substitution le cas échéant, de dimensions géopolitiques influant sur les grands équilibres du commerce mondial,
4. une appréciation des évolutions de contraintes réglementaires environnementales¹³, et notamment celles, en plein essor, relatives à la protection et la restauration de la biodiversité et des écosystèmes, qui pourront contraindre les activités de RTE ou à l'inverse apporter des opportunités en valorisant les bonnes pratiques.

¹⁰. Confer, par exemple : Christophe Poinssot, BRGM, Chief Scientific Officer, Présentation au World Materials Forum 16-18 juin 2022

¹¹. Plan industriel du pacte vert (Green Deal), Règlement « Taxonomie », Net Zero Industry Act, Critical Raw Materials Act, Règlement Ecoconception (ESPR)...

¹². Cf. Directive européenne CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive)

¹³. Découlant par exemple du Pacte vert européen (Green Deal)

La consolidation des critères relatifs aux différents composants individuels en une représentation systémique sera essentielle pour que les décisions prises soient cohérentes avec les objectifs visés et pour que les efforts soient mis sur les actions à plus forte valeur ajoutée.

En second lieu, après identification des fragilités les plus critiques, il sera nécessaire de valider la faisabilité et les conditions de réussite techniques de solutions alternatives

fondées sur des critères d'écoconception et de circularité, recyclabilité, réparabilité, puis d'identifier les modèles économiques propices à l'émergence de nouvelles filières pour les besoins de RTE.

À titre d'illustration, l'émergence d'alternatives industrielles au gaz SF6 pour l'isolation des équipements de postes électriques ainsi que la maîtrise des tensions sur l'approvisionnement en cuivre constituent deux sujets de premier plan pour la feuille de route R&D.

Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « C2 » par des travaux dans quatre domaines :

Maîtrise des émissions GES relatives aux systèmes de coupure et d'isolement		
Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
► Identifier des technologies de coupure ou d'isolement sans SF6 pour les postes sous enveloppe métallique, permettant de se conformer aux exigences réglementaires européennes relatives aux gaz fluorés à effets de serre, et de les expérimenter pour en faire les preuves de concepts et démonstrations préindustrielles (évaluation des performances fonctionnelles et des impacts organisationnels).	Expérimentation d'un disjoncteur sans SF6 420 kV et d'un PSEM DC 550kV avec coupure sous gaz sans SF6, à faible encombrement pour poste offshore (accomplissement des TRL 6 et 7).	Programme « Gestion des Actifs » / Feuille de route « Modéliser, expertiser, prédire le comportement des actifs »

Notes : ces travaux bénéficient de leviers de collaboration et de financements institutionnels dans le cadre du projet Horizon Europe MISSION.

Quantifications et analyses environnementales

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Élaborer les méthodes scientifiques pour identifier et quantifier les principaux impacts des activités de gestion du RPT sur l'environnement, la biodiversité, les écosystèmes et les dimensions sociales, et explorer les adaptations possibles pour concourir à leur protection et restauration.	Validation de concept puis démonstration de protocoles d'inventaire de biodiversité simplifiés relatifs aux infrastructures terrestres (accomplissement des TRL 4, 5, 6). Analyse exploratoire d'adaptations propices à la protection et à la restauration de l'environnement, de la biodiversité, des écosystèmes (accomplissement des TRL 2, 3, 4).	Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Énergie, réseau et biodiversité » Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Ecoconception, analyses environnementales et de résilience »
▶ Identifier des modèles d'éco-conception de solutions d'infrastructures (i.e. systèmes d'infrastructures par opposition aux équipements unitaires) et évaluer les gains en durabilité et résilience. ▶ Identifier et comparer différents modèles d'organisation de circularité, et notamment de filières de recyclage pour en analyser les forces et faiblesses au regard des besoins de RTE et des contraintes réglementaires et industrielles.	Preuve de concept puis expérimentation d'écoconception appliquée à deux solutions d'infrastructures pilotes. Appui à l'expérimentation de filières « preuve-de-concept » et analyse des modèles d'organisation.	Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Ecoconception, analyses environnementales et de résilience »

Régulation, Pacte vert, normes environnementales

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Mener des veilles technico-réglementaires sur les composants du réseau pour anticiper les restrictions d'usages (autres que le SF6).	Anticiper et influencer les prescriptions normatives relatives aux matériels RPT afin de réduire les risques de choix industriels non conformes ou financièrement pénalisants	Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Normalisation »

Quantification des enjeux d'approvisionnement

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
► Établir une vision prospective des bilans matières nécessaires aux systèmes énergétiques futurs (actifs de réseau, de production, de conversions énergétiques...) et confronter ces bilans à des cartographies de flux l'économie mondiale (besoins, ressources, capacités, risques géopolitiques) afin de mettre en évidence les inducteurs de coûts et principaux risques d'approvisionnement pour les infrastructures RTE.	Conception méthodologique puis réalisation d'études tête de série.	Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Système énergétique futur » Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Ecoconception, analyses environnementales et de résilience »

C3. Anticiper les risques et opportunités par la prospective et la résilience aux incertitudes fortes, dans un contexte d'instabilités accrues

Dans le cadre de missions prévues par le code de l'énergie (Bilan Prévisionnel) ou en réponse à des saisines du Gouvernement (*Futurs énergétiques 2050*), RTE réalise périodiquement des études prévisionnelles sur le système électrique. Ces études, à l'image des *Futurs énergétiques 2050*, constituent des références incontournables pour la politique énergétique nationale. Pour cela, elles s'appuient sur des modèles issus de travaux scientifiques qui confortent la plausibilité et la cohérence des scénarios étudiés.

Les dimensions explorées par ces études, et donc la palette de modèles employés, doivent évoluer avec le contexte géopolitique, économique, social ou encore environnemental, pour apporter des éclairages à de nouveaux termes de débat. Ainsi, les *Futurs énergétiques 2050* ont mis en œuvre plusieurs innovations découlant de travaux de R&D (modélisation du changement climatique, de scénarios de sobriété, de couplages gaz-électricité, d'empreintes matières...). Aujourd'hui, la conjonction d'objectifs de décarbonation accélérée et de réindustrialisation et d'un contexte de tensions macroéconomiques, géopolitiques et écologiques accrues, soulève de nouvelles problématiques de modélisation (optimisation énergétiques intersectorielle, approvisionnements en matières et technologies, gisements de sobriété, adaptation au climat, dynamique de réindustrialisation européenne...).

En outre, ces outils d'étude prospective jouent également un rôle primordial dans la construction et l'analyse critique des trajectoires de gestion des actifs et d'adaptation du réseau. Ils fournissent des données d'entrée aux études technico-économiques, aident à apprécier la

cohérence entre les trajectoires d'investissement pour les années à venir et une vision prospective de l'évolution du système électrique, et permettent ainsi des dimensionnements robustes en considérant un faisceau de scénarios futurs.

Par ailleurs, des risques « hors modèles » se réalisent. Par exemple, il a fait 39 °C à Brest au cours de l'été 2022 : ce n'est présent dans aucun des scénarios climatiques pour 2050 fournis par Météo-France. Suite aux inondations 2021, le gestionnaire de réseau de distribution E.ON prend la décision de relocaliser ses postes au-delà du risque de crue centennale¹⁴. Les chaînes d'approvisionnement sont perturbées (Covid, Ukraine) au-delà des anticipations des marchés ou des achats.

Ces risques hors modèles sont alimentés par des facteurs de perturbations durables : les alertes se multiplient concernant les tensions prévisionnelles sur le cuivre et plus généralement sur de multiples ressources critiques pour les systèmes énergétiques¹⁵, les projections d'impact du GIEC concluent que plus de 3 milliards de personnes vivent dans des contextes hautement vulnérables au changement climatique¹⁶, des services écosystémiques vitaux sont menacés par l'effondrement en cours de la biodiversité¹⁷, des multiples points de bascule climatique pourraient être franchis entre +1,5 °C et +2,0 °C¹⁸. Ainsi, l'ONU pointe jusqu'au risque d'effondrement systémique¹⁹. Dans ce contexte d'instabilités accrues, il semble donc opportun de maintenir un effort soutenu d'intelligence économique, sociétale, technologique et d'exploration des futurs possibles.

14. E.ON presentation at Online Conference: Adaptation & Resilience - Ensuring the energy transition is built on resilient infrastructure, on the 14th of March 2023, jointly hosted by RGI and the European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E).

15. Des études du BRGM pointent de multiples éléments critiques, tandis que NEXANS affirme que « La pénurie de cuivre est écrite »

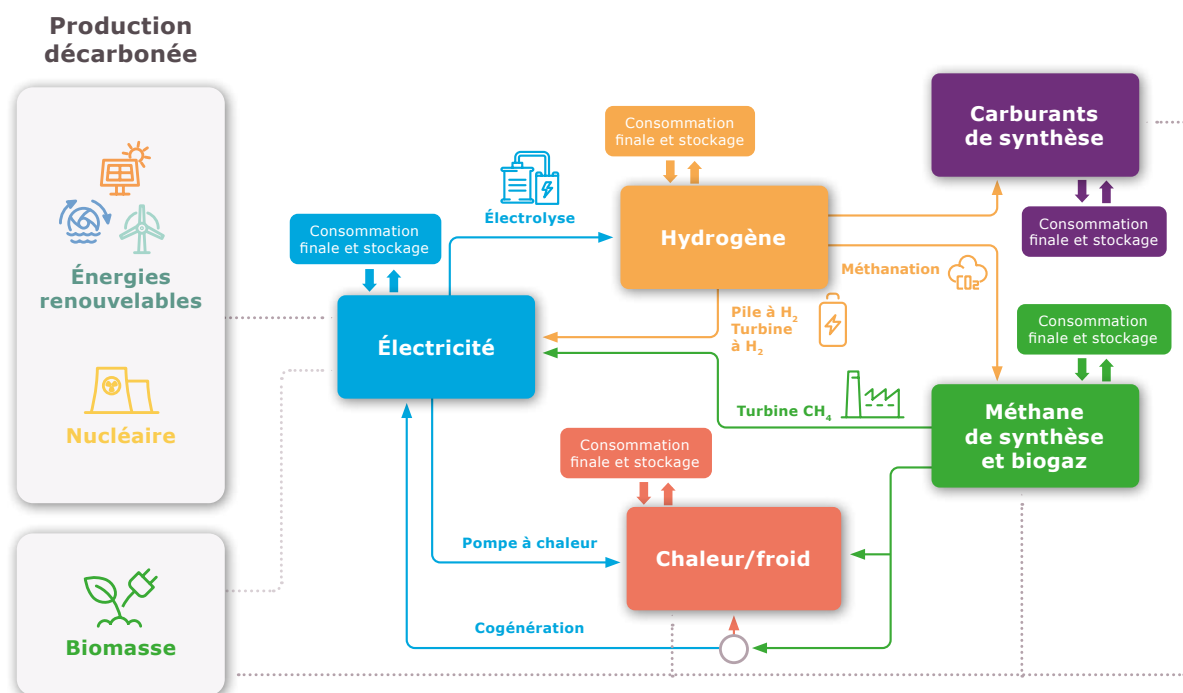
16. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/resources/spm-headline-statements/>

17. <https://www.nature.com/articles/nature10548>

18. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn7950>

19. <https://www.undrr.org/gar/gar2022-our-world-risk-gar>

FIGURE Principales interactions entre l'électricité et les autres vecteurs énergétiques



Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « C3 » par des travaux dans deux domaines :

Méthodes et outils pour les études prospectives et d'adéquation		
Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
► Maquetter puis développer une nouvelle génération de méthodes et d'outils pour les études de prospective des systèmes énergétiques et d'adéquation entre infrastructures et usages, avec une finesse adéquate allant des bilans énergétiques annuels jusqu'au fonctionnement à granularité horaire, et qui soient notamment en capacité de modéliser les nouveaux usages et technologies, de tenir compte de couplages entre vecteurs énergétiques et de produire des indicateurs de performance multicritères/multi-capitaux.	Accomplissement des TRL 5,6 et 7.	Programme « Climat, Équilibre Offre-demande et Réseau long terme » / Feuille de route « Modélisation EOD long-terme » Programme « Prévisions court-terme et EOD court-terme » / Feuille de route « EOD court-terme » Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Système énergétique futur »

Intelligence économique, sociétale, technologique et exploration des futurs possibles

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Assurer une veille technologique sur les composants des systèmes énergétiques afin d'en comprendre les caractéristiques techniques, économiques, environnementales. ▶ Comprendre les facteurs physiques et géopolitiques relatifs aux ressources et chaînes d'approvisionnements nécessaires aux systèmes énergétiques afin d'en tenir compte dans les études prospectives (tensions sur les prix, retards, pénuries). ▶ Explorer les futurs possibles des systèmes énergétiques (contextes environnemental, économique et sociétal, usages de l'énergie, technologies de production, couplages entre vecteurs, fondamentaux des coûts, indicateurs multi-capitaux) afin d'identifier de nouvelles dimensions qui pourraient prendre de l'importance dans le futur (par exemple, le stockage saisonnier de chaleur), d'en comprendre les conséquences tant pour les missions de RTE que pour le fonctionnement du système dans son ensemble et d'anticiper les transformations requises.	Apporter des éclairages étayés sur des dimensions économiques, sociétales, géopolitiques, technologiques de premier ordre qui pourraient orienter les études prospectives énergétiques futures, à l'image des dimensions explorées en TURPE 6 ayant contribué aux <i>Futurs énergétiques 2050</i> (couplages multi-énergies, sobriété).	Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Système énergétique futur » Programme « Environnement, société et prospective » / Feuille de route « Énergie, réseau et société »

2.5 Un objectif transverse de collaboration et co-construction au service des précédentes finalités

D1. Accélérer et amplifier l'impact des projets par les collaborations académiques et industrielles, l'open source, la normalisation et la construction de ressources partagées

Les ambitions de R&D précédemment décrites ne pourront être atteintes qu'au moyen de coopérations accrues avec un écosystème de partenaires élargi et en intégrant les innovations scientifiques de multiples horizons. Compte-tenu de la diversité des activités à mener, des complexités, nouveautés et incertitudes que chacune d'elles comporte, il sera en effet essentiel de mutualiser les ressources avec d'autres parties prenantes, de gagner du temps en réutilisant et en partageant les résultats, de fédérer des compétences multiples que RTE ne peut constituer isolément, de s'appuyer sur des développements scientifiques à la pointe de la recherche académique et appliquée, de promouvoir la standardisation

et l'interopérabilité intrinsèque pour bénéficier d'effets d'échelle et faciliter l'intégration de solutions dans le réseau et au-delà des frontières de l'entreprise.

En outre, ce renforcement des collaborations doit non seulement être promu vis-à-vis de l'externe de l'entreprise mais aussi en interne. À ce titre, diverses bonnes pratiques issues de modèles de collaboration ouverte peuvent être mises à profit pour accroître la productivité par la construction de ressources (technologiques, scientifiques, logicielles, intellectuelles) partagées entre les applications, ou encore par des interactions renforcées entre la R&D et les autres entités parties prenantes.



Le Plan R&D 2025-2028 vise à répondre à cet objectif « D1 » par des travaux dans quatre domaines :

Collaborations scientifiques

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Explorer, en s'appuyant sur des collaborations scientifiques, puis adapter et qualifier sur les cas d'usages « grandeur industrielle » de RTE, de nouvelles solutions algorithmiques pour la simulation numérique, l'optimisation robuste, et plus généralement l'aide à la décision, en tirant notamment parti de techniques d'hybridation entre modélisation physique et apprentissage automatique (machine-learning) afin de réduire les complexités algorithmiques et obtenir des performances exploitables.	Transfert de multiples solutions algorithmiques dans des applications prototypes ou de démonstration en grandeur réelle.	Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Stratégie trans-programme des outils d'aide à la décision »

Montage de partenariats et recherche de financements

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Identifier les opportunités de partenariats pour des projets spécifiques et d'en assurer le montage (recherche de partenaires, négociation des termes, contractualisation). ▶ Identifier les opportunités de participation à des consortiums bénéficiant de financements institutionnels (Horizon Europe, France 2030...), de participer à la construction des dossiers de candidature puis, le cas échéant, aux montages et suivis administratifs des projets. ▶ Contribuer à l'émergence et à la réalisation d'activités de R&D collaboratives au sein de la structure CRESYM²⁰, en adéquation avec besoins de RTE, et d'intégrer les résultats dans les travaux internes.	Doublement du volume de collaborations visant la co-construction de ressources partagées au service des précédents objectifs de R&D.	Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Partenariats et valorisation »

²⁰. <https://cresym.eu/>

Normalisation et pré-normalisation

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Structurer et coordonner les travaux de contribution à l'élaboration des normes, notamment par la veille, l'analyse des risques et opportunités, l'élaboration de propositions et l'implication dans les instances et les groupes de travail (incluant, entre autres l'animation du « WS9 : Green Electricity System » du High-Level Forum on European Standardisation), avec un focus sur les normes relatives aux prescriptions pour la stabilité du réseau, celles découlant du règlement écoconception (ESPR) et celles concernant l'interopérabilité des technologies à courant continu (HVDC).	Orientation des travaux de normalisation dans les domaines mentionnés en accord avec les besoins de transformation industrielle au meilleur coût de RTE.	Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Normalisation »

Open source

Consistance	Accomplissements ambitionnés en TURPE 7	« Programmes » / « Feuilles de route » contribuant à l'ambition
▶ Poursuivre l'implication dans la gouvernance et le développement de la fondation LF Energy²¹ pour accroître, par l'adoption de bonnes pratiques open source et le développement des communautés, l'envergure, la solidité industrielle et la dynamique d'innovation des projets qui y sont hébergés. ▶ Fort des succès constatés, œuvrer pour l'émergence de collaborations open source nouvelles pour soutenir les activités de R&D de la période TURPE 7.	Doublement du volume de collaborations open source visant la co-construction de ressources partagées au service des précédents objectifs de R&D.	Programme « PRISME : partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programmes » / Feuille de route « Open Source »

²¹. <https://lfenergy.org/>

Modèle de R&D mis en œuvre



3

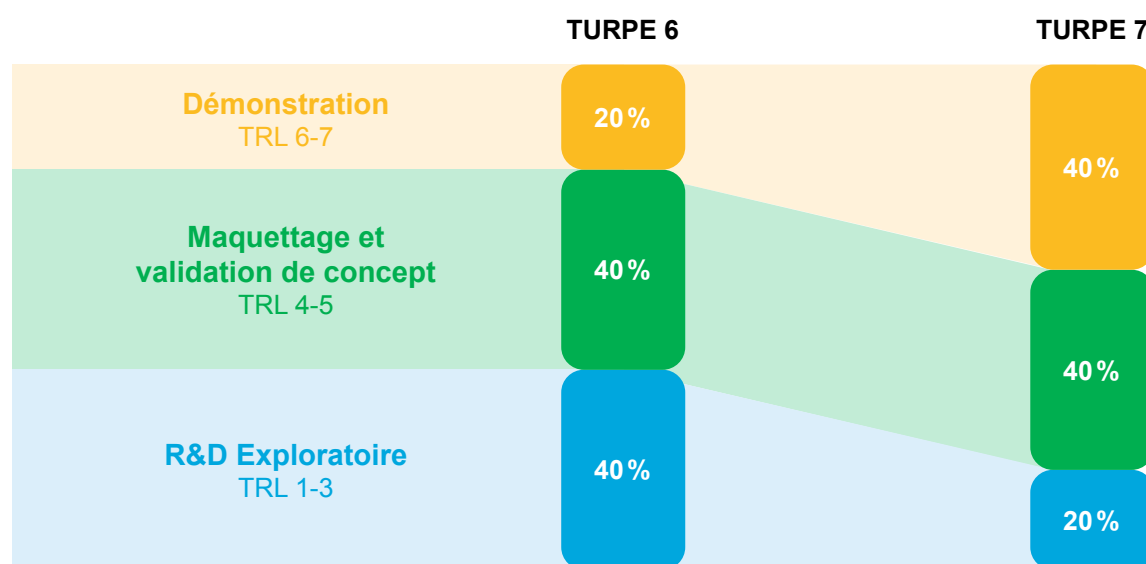
3.1 Croissance et accélération

Le plan R&D pour la période TURPE 7, dont les objectifs précédemment exposés sont guidés par des priorités d'entreprise, de filière et de société, se traduit par une croissance d'ambition notable par rapport à la période TURPE 6. Cette évolution répond, d'une part, à une démultiplication et un renforcement de problématiques industrielles de diverses natures, telles qu'exposées au chapitre précédent (« Objectifs du Plan R&D 2025-2028 »), et auxquelles il paraît oppor-

tun de répondre par des actions de R&D, et d'autre part, à la nécessité d'une accélération afin que les résultats de R&D soient disponibles en amont des transformations que RTE devra engager pour qu'ils puissent avoir un impact industriel.

Le besoin d'accélération transparait notamment dans la répartition de l'effort de R&D par niveau de maturité visée pour la période TURPE 7 :

FIGURE Évolution de la répartition cible de l'effort R&D par niveau de maturité



Évolution de la part des TRL entre TURPE 6 et TURPE 7

3.2 Créer et exploiter davantage d'opportunités de collaboration pour mutualiser les ressources et accélérer le rythme de l'innovation

RTE a organisé le 30 janvier 2024 une conférence en ligne, intitulée « Empowering an accelerated energy transition – The next R&D ambition », pour présenter à l'écosystème de partenaires de R&D une première vision des défis de R&D à relever au cours de la période 2025-2028. Cet événement a réuni plus de 500 participants à travers le monde, représentant plus de 200 entités et incluant des gestionnaires de réseau européens, des industriels à dimension internationale, des sociétés de service, des startups, des institutions académiques et de recherche et des administrations publiques. Un sondage réalisé lors de cet événement, et auquel 184 participants ont répondu, a révélé que plus de 90 % des répondants considèrent que la R&D sera essentielle à la transition énergétique, plus de 80 % sont d'avis que la part de la R&D dans la chaîne de valeur des réseaux électriques devra s'accroître significativement en comparaison avec la précédente décennie et une large majorité estime que le programme d'activités envisagé par RTE semble qualitativement pertinent voire insuffisamment ambitieux. En outre, près des deux-tiers des répondants estiment que RTE est un acteur de tête dans la R&D col-

laborative, près des trois-quarts considèrent que RTE devrait davantage promouvoir les modèles de collaboration ouverte et plus de 80 % qu'il pourrait y avoir des opportunités de co-investissement avec RTE dans certains des travaux de R&D présentés.

Les multiples partenariats de R&D engagés au cours de la période TURPE 6 et l'investissement dans le développement des deux véhicules phares que sont LF Energy²² et Cresym²³ reflètent la conviction que le renforcement des collaborations sera une dimension essentielle à l'atteinte des objectifs de R&D. Pour la période TURPE 7, cet objectif de renforcement est porté par les activités transverses précédemment décrites dans la section « D1. Accélérer et amplifier l'impact des projets par les collaborations académiques et industrielles, l'open source, la normalisation et la construction de ressources partagées ».

LF ENERGY
STRATEGIC MEMBER



²². www.lfenergy.org

²³. <https://cresym.eu/>

3.3 Renforcer les collaborations R&D Transport-Distribution

Un champ de collaboration particulièrement important pour la période TURPE 7 se situera entre RTE et les Gestionnaires de Réseaux de Distribution français. Ces collaborations seront essentielles à plusieurs titres :

- ▶ pour la coordination des trajectoires d'investissement : dans un contexte de forte croissance des besoins d'adaptation et de renouvellement des infrastructures, la co-construction d'éléments communs pour les méthodes et outils d'étude des investissements (modélisation technico-économique, analyse des risques et optimisation robuste) permettra une meilleure représentation des interactions entre les deux réseaux, facilitera le partage d'informations et fournira davantage d'éléments de compréhension mutuelle pour contribuer, in fine, à la cohérence des décisions ;
- ▶ pour la performance de la conduite opérationnelle des réseaux : en explorant les possibilités de mutualisation des leviers de gestion des transits et de la tension ;
- ▶ pour créer les conditions favorables à l'équilibre offre-demande efficace dans la durée, par la modulation structurelle et flexibilité des usages : en identifiant les dispositifs et composants d'interopérabilité mutualisés que les gestionnaires de réseau pourraient mettre en avant pour faciliter l'émergence de systèmes de pilotage des usages chez les consommateurs et l'émergence d'offres tarifaire appropriées chez les fournisseurs, et en menant des expérimentations terrain (démonstrateurs) pour valider les conditions de réussite techniques, économiques, réglementaires et contractuelles ;
- ▶ plus généralement, pour mutualiser les ressources et compétences consacrées à des problématiques de recherche et développement partagées, par exemple dans le champ de la gestion des actifs.

Un premier pas important a été entrepris durant la période TURPE 6 avec la signature, le 15 décembre 2022, d'une convention de partenariat R&D entre RTE et GÉRÉDIS Deux-Sèvres, gestionnaire du réseau de distribution d'électricité concédé par le Syndicat Intercommunal d'Énergie des Deux-Sèvres (SIEDS). Cette convention identifie 6 domaines exploratoires (ou « fiches action ») dans lesquels les deux entreprises envisagent de collaborer en R&D :

- 1) modélisation de réseaux et outils associés,
- 2) leviers de flexibilité et interactions entre les réseaux,
- 3) développement conjoint des réseaux intégrant les flexibilités disponibles,
- 4) modèle prédictif de la croissance de la végétation,
- 5) détection automatique de défauts & analyse et classification des données LIDAR,
- 6) arbitrage maintenance/renouvellement, relation entre défauts détectés des matériels et incidents.

Des travaux communs ont été engagés dans ce cadre depuis 2022, avec des progressions notables notamment dans les domaines 1, 4 et 5. Les moyens consacrés sont restés modestes jusqu'à présent, en cohérence avec les dotations prévues dans les trajectoires tarifaires (TURPE 6/FPE 2022-2025). RTE et Gérédis perçoivent aujourd'hui un intérêt mutuel à faire croître l'ambition de la collaboration durant la période TURPE 7.

Sous réserve des moyens budgétaires alloués dans les feuilles de route R&D respectives, RTE et Gérédis envisagent de porter les ambitions suivantes sur la période 2025-2028 :

1) Au regard d'une finalité de coordination pour une meilleure optimisation trajectoires d'investissement :

- ▶ poursuite et renforcement des travaux relatifs au développement de méthodes et outils d'étude des réseaux et de construction de corpus de données partagés, dans la continuité de la « fiche action n° 1 » mentionnée ci-dessus ;
- ▶ exploration de méthodes permettant l'optimisation conjointe des actions de maintenance, de renouvellement et de développement des actifs, avec une attention particulière à la modélisation des conséquences sur le service rendu et à la quantification des risques industriels et opérationnels résiduels ;
- ▶ définition et réalisation d'une étude pilote pour démontrer la valeur d'une recherche de cohérence pour les ouvrages à l'interface (poste source).

2) Au regard d'une finalité de coordination de leviers pour la gestion opérationnelle des réseaux :

- ▶ poursuite et renforcement des travaux de la fiche action « leviers de flexibilité et interactions entre les réseaux », en ciblant d'abord la problématique de gestion de la tension, pour laquelle il s'agirait, dans un premier temps, de démontrer par une étude technico-économique les gains opérationnels d'une gestion dynamique coordonnée de consignes de réactif mettant en œuvre différents leviers (sites de production, équipements STATCOM dans les postes source), et dans un deuxième temps, d'en valider les résultats et la faisabilité par une démonstration en environnement d'essai voire opérationnel.

3) Au regard d'une finalité de facilitation de la modulation structurelle et flexibilité des usages :

- ▶ étude d'opportunité, définition du cahier des charges puis mise en œuvre le cas échéant d'un démonstrateur à l'échelle du territoire des Deux-Sèvres, avec pour objectifs : d'identifier les dispositifs et composants d'interopérabilité mutualisés que les gestionnaires de réseau pourraient mettre en avant pour faciliter l'émergence de systèmes de pilotage des usages chez les consommateurs et l'émergence d'offres tarifaires appropriées chez les fournisseurs, et valider les conditions de réussite techniques, économiques, réglementaires et contractuelles.

4) Au regard d'une finalité de mutualisation de ressources et compétences dans le domaine de la gestion des actifs :

- ▶ poursuite et renforcement des travaux relatifs à la modélisation prédictive de la croissance de la végétation, dans la continuité de la « fiche action n° 4 » mentionnée ci-dessus ;
- ▶ poursuite et renforcement des travaux relatifs à la détection automatique de défauts et l'analyse et classification des données LIDAR, dans la continuité de la « fiche action n° 5 » mentionnée ci-dessus.

Ces travaux, ainsi que les budgets correspondants pour RTE, sont inclus dans les activités de R&D décrites relativement aux objectifs A1, A2, B2 et B3.

La réalisation des démonstrateurs évoqués aux points 2 et 3 ci-dessus nécessitera vraisemblablement des financements complémentaires à la régulation incitative de la R&D dans le cadre du TURPE. Les plans de financement correspondants seront définis dans le cadre des études préalables mentionnées.

Enfin, RTE et Gérédis souhaitent diffuser autant que possible les résultats issus de la collaboration selon des modalités open source, notamment avec l'objectif de permettre une réutilisation, voire l'émergence de collaborations au-delà de ce cadre bilatéral.

Programmes et feuilles de route



4

4.1 Programme « Prévisions et équilibre offre-demande court-terme » (PCTEO)

Le programme « Prévisions et équilibre offre demande court-terme » a pour ambition de développer un ensemble d'outils et de méthodes pour assister les opérateurs du système électrique (et processus opérationnels) dans l'anticipation des injections, soutirages et des équilibrages offre-demande sur

le réseau, à des horizons entre sept jours et le temps réel.

Ce programme se compose de deux feuilles de route :

- ▶ Prévisions court-terme
- ▶ Équilibre offre-demande court-terme

Feuille de route « Prévisions court-terme »

L'objectif de la feuille de route est de concevoir, prototyper et expérimenter des méthodes innovantes pour la prévision des injections et soutirages, afin d'en améliorer les performances, par des techniques d'hybridation entre modèles physiques et intelligence artificielle, de diversifier les sources (prévisions multi-modèles, multifournisseurs) pour réduire

et mieux caractériser les incertitudes associées, d'automatiser la chaîne depuis l'apprentissage jusqu'à l'exécution des modèles, ou encore d'intégrer des informations exogènes transmises par les parties prenantes et modéliser des comportements de modulation en réponse à des signaux de marché (et autres comportements de flexibilité).

Feuille de route « Équilibre offre-demande court-terme »

Cette feuille de route a pour vocation d'étudier les évolutions requises des processus de gestion de l'équilibre offre-demande, pour prendre en compte l'évolution des profils d'incertitudes des productions et consommations, la réduction des fenêtres opérationnelles, les dynamiques de marché et les comportements des acteurs, l'arrivée de nouveaux fournisseurs de services équilibrage, ou encore les

plateformes européennes d'échange d'énergie d'équilibrage. Elle vise aussi à prototyper et expérimenter des outils d'aide à la décision qui permettent aux opérateurs d'assurer une gestion efficiente et maîtrisée de l'équilibre du système. Enfin, elle s'intéresse aux interactions entre les processus opérationnels de gestion des flux et de gestion de l'équilibre offre-demande.

4.2 Programme « Pilotage du réseau » (PILOT)

Le programme « Pilotage du réseau » a pour ambition de développer un ensemble d'outils et de méthodes pour assister les opérateurs du système électrique (et processus opérationnels) dans la gestion des transits sur le réseau et dans le choix de trajectoires d'exploitation efficaces et

robustes, à des horizons entre deux jours et le temps réel.

Ce programme se compose de deux feuilles de route :

- ▶ Pilotage des flux
- ▶ Smart Cockpit Interactif

Feuille de route « Pilotage des flux »

Cette feuille de route vise à concevoir, prototyper et expérimenter des nouvelles solutions d'analyse de la sécurité de fonctionnement du réseau et d'aide à la conduite, en anticipation, fondées sur l'état de l'art des techniques scientifiques (simulation numérique, intelligence artificielle, optimisation robuste, hybridation de méthodes d'optimisation et d'ap-

prentissage automatique (machine-learning)), permettant de modéliser les complexités de fonctionnement du réseau, les dynamiques temporelles, les incertitudes et les capacités d'actions curatives apportées par les différents leviers de flexibilité, et de proposer aux opérateurs des actions préventives nécessaires à la bonne conduite du réseau.

Feuille de route « Smart Cockpit Interactif »

Cette feuille de route vise à repenser l'interface homme-machine et développer des systèmes d'assistance bi-directionnels intelligents pour aider les opérateurs à prendre des décisions

efficaces et rapides, tout en gérant la complexité croissante et la surcharge d'informations, notamment dans des contextes opérationnels dynamiques, contraints voire critiques.

4.3 Programme « Maîtrise et simulation de la stabilité du réseau » (MAESTRO)

Le programme « Maîtrise et simulation de la stabilité du réseau » a pour ambition de fournir le cadre scientifique d'analyse, les méthodes et les outils permettant à RTE d'assurer la maîtrise de la stabilité et de la qualité de l'électricité du réseau face à l'expansion de la production décentralisée, de nouveaux types de consommations et d'in-

terfaces de conversion à électronique de puissance.

Ce programme se compose de deux feuilles de route :

- ▶ Simulateurs électrotechniques du fonctionnement du système
- ▶ Stabilité d'un système en forte mutation

Feuille de route « Simulateurs électrotechniques du fonctionnement du système »

Cette feuille de route a pour objet d'enrichir la suite logicielle Dynawo qui constitue une gamme d'outils de simulation open source, flexibles, évolutifs, interopérables, transparents et robustes pour la réalisation d'un large spectre d'études de réseau, et avec une prise

en compte améliorée des nouvelles technologies raccordées. L'accent est mis sur le développement d'un module permettant de simuler les interactions lentes entre convertisseurs et d'un simulateur dynamique pour le calcul de courant de court-circuit.

Feuille de route « Stabilité d'un système en forte mutation »

La finalité de cette feuille de route est de développer les connaissances et les méthodes nécessaires à RTE pour assurer la stabilité du système électrique dans un contexte de transformations du système électrique (raccordement de nouveaux types de productions et de consommations, de forte puissance ou décentralisées, expansion de composants interfacés au réseau électrique par de l'électronique de puissance). La feuille de route répond aux

besoins de i) définition des exigences pour les nouveaux dispositifs raccordés au réseau, ii) conception des outils pour assurer une surveillance accrue et plus proche du temps réel de la stabilité du réseau, iii) identification de moyens nécessaires pour la maîtrise efficiente de ces risques et iv) repenser l'exploitation et les protections du système pour assurer sa résilience.

4.4 Programme « Tension, Protection, Stabilité » (TENPOS)

Le programme « Tension, Protection, Stabilité » a pour ambition d'étudier les impacts d'une transformation progressive des objets connectés au réseau (expansion de composants interfacés au réseau électrique par de l'électronique de puissance, nouveaux types de productions et de consommations, tant de forte puissance et connectées au réseau de transport que décentralisées et raccordées sur les réseaux de distribution) sur le maintien de la stabilité et de la qualité de l'électricité, en se focalisant plus spécifiquement sur le comportement des équipements à électronique de puissance (sta-

tions HVDC, onduleurs), sur les dispositifs de gestion de la tension et sur les plans de protection. Elle vise ainsi à identifier et émettre des recommandations d'évolutions du cadre réglementaire et normatif pour les connexions au réseau et des dispositifs internes assurant la sûreté de son fonctionnement.

Le programme est constitué de trois feuilles de route :

- ▶ Électronique de puissance et courant continu
- ▶ Tension
- ▶ Protections

Feuille de route « électronique de puissance et courant continu »

Cette feuille de route a pour objet d'étudier l'impact de l'accroissement progressif des équipements actifs à base d'électronique de puissance sur la stabilité du réseau, sur l'architecture du réseau, sur le pilotage du réseau. Elle est composée de trois axes d'études complémentaires :

- ▶ Raccordement DC et réseaux à courant continu
- ▶ Interactions et interopérabilité dans un système hybride (AC et DC)
- ▶ Nouvelles opportunités offertes par les équipements à base d'électronique de puissance

Feuille de route « Tension »

Cette feuille de route vise à développer des connaissances, méthodes et outils permettant à RTE d'assurer une gestion efficace de la tension électrique du réseau, à tous les horizons temporels depuis le temps réel jusqu'à la prospective long terme. Les travaux qui la composent suivent quatre axes complémentaires :

- ▶ Amélioration et enrichissement des données permettant d'observer les différents phénomènes.

- ▶ Développement de modèles et d'algorithmes permettant de simuler adéquatement le comportement en tension du réseau.
- ▶ Conception de méthodes et outils pour superviser, piloter, assister à la gestion en anticipation de la tension
- ▶ Réalisation d'études pour éclairer les décisions d'investissement et besoins d'évolution des dispositifs et du cadre réglementaire ou normatif relatifs la gestion de la tension.

Feuille de route « Protections »

La conception des systèmes protection actuels repose sur des modèles de comportement du réseau en régime de défaut construits avant l'essor des convertisseurs à électronique de puissance. Cette feuille de route a par conséquent pour objectif d'étudier l'impact d'une proportion croissante de convertisseurs sur les performances des protections lors de défauts affectant le réseau, afin d'estimer les risques de dysfonctionnements et proposer des ajustements techniques ou réglementaires. Pour cela, les travaux prévus visent à :

- ▶ rechercher des indicateurs synthétiques permettant d'identifier les situations d'exploitation dans lesquelles systèmes de protection actuels sont susceptibles de ne pas fonctionner efficacement ;
- ▶ à partir de ces indicateurs, recenser les situations d'exploitation à risque pour le réseau HTB, autant d'un point de vue géographique que temporel ;
- ▶ identifier, en lien avec les constructeurs de protection, des solutions permettant d'atténuer les risques de dysfonctionnements. De même, identifier les évolutions des codes de réseau, les plus favorables pour le comportement des protections ;
- ▶ proposer une évolution du plan de protection des réseau HTB, en ciblant prioritairement les niveaux 63 et 90 kV, les plus concernés et à l'interface avec le réseau de distribution.

4.5 Programme « Gestion des actifs » (GA)

Le programme « Gestion des actifs » vise à concevoir et développer des méthodes et outils innovants au service de la gestion des actifs de RTE. Les besoins auxquels ce programme répond sont d'améliorer la compréhension des états et dégradations des actifs notamment grâce à la modélisation et la simulation numérique à partir des modèles physiques et des données, de simuler des politiques de gestion d'actifs, avec une représentation des risques d'avaries et des conséquences, pour aider à la détermination des meilleures stratégies, d'automatiser grâce aux nouvelles technolo-

gies les inspections du réseau et améliorer les conditions d'intervention des opérateurs.

Ce programme se compose de trois feuilles de route :

- ▶ Automatisation d'Inspection du Réseau et Modernisation des Moyens d'Intervention (AIRM²I)
- ▶ Modéliser, Expertiser, Prédire le comportement des actifs
- ▶ Systèmes d'Aide à la Gestion des Actifs (SAGA)

Feuille de route « Automatisation d'Inspection du Réseau et Modernisation des Moyens d'Intervention » (AIRM²I)

Cette feuille de route vise à développer des solutions innovantes pour faciliter et automatiser les actions d'inspection et d'intervention sur le réseau de transport d'électricité, en tirant parti des nouvelles technologies, notamment par l'utilisation de porteurs différents de plus en plus autonomes (hélicoptères, drones, robots), de capteurs, d'imagerie satellite, et de traitements des données par Intelligence Artificielle.

Les travaux de R&D portés par cette feuille de route consisteront principalement à :

- ▶ Expérimenter une chaîne d'acquisition et de traitement de données photographiques et LIDAR par hélicoptère puis drone (en se focalisant sur les spécifications des capteurs intégrés et sur les traitements algorithmiques et IA – tout en assurant une veille sur les progrès du drone longue élévation « Beyond Visual Line Of Sight »).

- ▶ Expérimenter la combinaison d'images satellite et d'algorithmes d'IA pour la détection automatique et étendue d'événements ou le contrôle ciblé (proximités de végétation, chantiers tiers, contrôles travaux, etc.).
- ▶ Expérimenter l'emploi de drones automatiques pour la surveillance et l'inspection à distance des postes électriques, et l'inspection approfondie de pylônes.
- ▶ Assurer le transfert industriel des résultats d'expérimentation de robots pour l'inspection des lieux d'accès contraint ou dangereux.
- ▶ Poursuivre le développement d'une nouvelle combinaison pour les travaux sous tension.
- ▶ Contribuer au développement de opérations drone en technique Travaux sous Tension.

Feuille de route « Modéliser, Expertiser, Prédire le comportement des actifs »

L'optimisation de la gestion des actifs, à des fins d'efficacité économique, de développement durable, et de capacités de réalisation, nécessite des démarches méthodologiques plus élaborées que le renouvellement d'actifs ayant atteint un âge limite unique défini a priori. D'autres alternatives sont à considérer telles que des réhabilitations, remises à niveau ou des niveaux de maintenance différenciés. Les choix entre ces alternatives nécessitent des estimations de l'endommagement des actifs, résultats de simulations ou résultats d'observations, tenant compte des sollicitations passées et futures, avec les incertitudes associées.

La maîtrise des émissions de gaz à effets de serre constitue également un enjeu majeur de la gestion des actifs. À cette fin, RTE doit identifier des alternatives au SF6 (gaz ayant d'excellentes propriétés d'isolation électrique mais présentant un fort pouvoir de réchauffement) pour les postes sous enveloppe métallique, expérimenter la faisabilité du remplacement de gaz et préparer les conditions de son déploiement.

Les travaux de R&D portés par cette feuille de route consisteront principalement à :

- ▶ l'achèvement, le transfert industriel et l'approfondissement des travaux entrepris dans le domaine des liaisons aériennes (projet PALLAS), incluant des modélisations multi-physiques (thermique, fatigue mécanique, fretting, corrosion) et multi-échelles, de la portée aux contacts entre brins, permettent d'évaluer l'endommagement des conducteurs au regard d'historiques de sollicitation, ainsi que la validation de modèles de vieillissement associés à des contrôles non destructifs, et le développement de

jumeaux numériques des systèmes de liaisons aériennes (des conducteurs aux pylônes et ses fondations) ;

- ▶ la poursuite des travaux de recherche relatifs aux contrôles non destructifs, à la corrosion des lignes aériennes (conducteurs, pylônes, corrosion sous peinture), au vieillissement des fondations ;
- ▶ l'extension de ces démarches méthodologiques aux liaisons souterraines et sous-marines (collecte de données, modélisations mécaniques et thermiques, caractérisation du vieillissement des isolants, modélisation-simulation du comportement des câbles dynamiques), pour caractériser, modéliser et simuler les conditions de fatigue et vieillissement de ces actifs, dans un contexte de résilience au changement climatique ;
- ▶ l'approfondissement des modélisations thermiques des conducteurs (aériens, souterrains), des applications dans les codes de calculs d'ampacité (applications de *Dynamic Line Rating*), et prise en compte du changement climatique, en approfondissant notamment les problématiques de propagation d'incertitudes des données et des modèles sur les résultats ;
- ▶ l'étude des possibilités de rétrofilling des compartiments passifs des postes sous enveloppe métallique (PSEM) par un gaz alternatif au SF6 ;
- ▶ l'expérimentation et la validation de conditions de monitoring et surveillance des traversées des transformateurs de puissance, particulièrement vulnérables et dont les conséquences des défaillances sont importantes ;
- ▶ l'expérimentation de matériels neufs sans SF6 (disjoncteur SF6 420 kV et PSEM DC 550 kV à faible encombrement pour poste offshore).

Feuille de route « Systèmes d'Aide à la Gestion des Actifs » (SAGA)

Cette feuille de route vise à développer des méthodes et outils innovants, fondés sur la théorie de la fiabilité et la valorisation des conséquences, pour aider à l'optimisation des choix d'investissement en fonction de critères de valeur et de gestion du risque pour RTE et pour la collectivité. Cette optimisation doit englober le développement, le renouvellement et la maintenance des infrastructures dans un contexte contraint en ressources, capacité de réalisation et capacité à consigner le réseau.

Les travaux de R&D portés par cette feuille de route consisteront principalement à :

- ▶ poursuivre et étoffer, par le développement de modèles adaptés aux besoins de RTE, d'un socle de connaissances scientifiques approprié (théorie de la fiabilité, théorie du renouvellement, science des risques, optimisation socio-économique) et le disséminer au moyen de livrables documentaires et de formations ;
- ▶ collaborer à la définition d'un cadre méthodologique « Risk Informed Decision Making » partagé au sein de l'ENTSO-E et la Cigré, ainsi qu'au sein de l'entreprise ;
- ▶ participer à l'intégration de ces méthodes dans les travaux de normalisation (IEC, CE-NELEC, AFNOR) et notamment dans la norme IEC 123 ;
- ▶ poursuivre le développement de la bibliothèque de calcul Relife Open Source qui implémente les méthodes d'optimisation en gestion des actifs, et fédérer une communauté d'utilisateurs autour de cet outil, et des modèles de calcul en fiabilité ;
- ▶ poursuivre l'utilisation ciblée, le transfert incrémental vers les utilisateurs et l'enrichissement fonctionnel du simulateur holistique de politiques « Mona » ;
- ▶ poursuivre la démonstration et l'amélioration fonctionnelle du prototype « Scoop » pour l'aide à au placement annuel des consignations, et préparer son insertion dans les activités de planification opérationnelle en région ;
- ▶ analyser et identifier les évolutions requises des politiques de maintenance préventive (politique actuelle OMF – « Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité ») pour tenir compte des capacités et connaissances apportées par les méthodes et outils précités, du retour d'expérience de la politique actuelle et des évolutions technologiques des actifs, et élaborer les méthodes et algorithmes nécessaires à l'évolution de ces politiques ;
- ▶ concevoir et maquetter des méthodes d'optimisation de portefeuille de projets d'ingénierie (raccordement et renforcement, renouvellement, réhabilitation) fondées sur la définition de référentiels de valeur et de conséquences.

4.6 Programme « Futurs cyber-physiques et éco-conçus des infrastructures du réseau » (FCEIR)

Le programme « Futurs cyber-physiques et éco-conçus des infrastructures du réseau » a pour vocation de concevoir et développer de nouvelles solutions d'infrastructures matérielles et logicielles innovantes pour permettre l'adaptation efficiente et accélérée du réseau aux besoins futurs.

Ce programme se compose de trois feuilles de route :

- ▶ Architecture du système cyber-physique
- ▶ Virtualisation du Contrôle-Commande
- ▶ Maritime

Feuille de route « Architecture du système cyber-physique »

L'architecture de contrôle du réseau doit évoluer pour intégrer davantage d'automatismes distribués dans le système, avec pour double finalité d'accroître les capacités du réseau à accueillir de nouveaux usages et de tirer parti d'une automatisation avancée pour gérer une part des aléas opérationnels, notamment aux très courtes échéances temporelles.

Les travaux de R&D portés par cette feuille de route couvrent trois champs :

- ▶ La conception, le développement et la démonstration d'algorithmes cœur de calcul d'automatismes pour la gestion opérationnelle de contraintes de transits ou de tensions sur le réseau. Ces algorithmes sont notamment intégrés dans les automates NAZA (Nouveaux Automates de Zone Adaptatifs) pour la gestion des congestions HTB1 (90-63 kV). Des algorithmes pour des cas d'usage non couverts par NAZA sont également à l'étude.

- ▶ Le développement de plateformes pour simuler le fonctionnement des systèmes d'automates dans leur environnement qui entremêle le système électrique et les infrastructures numériques (logiciels, réseaux de communication). Ces plateformes de cosimulation permettront d'appréhender le fonctionnement de ces systèmes complexes à des fins de qualification pré-opérationnelle, de maintenance, d'analyse opérationnelle ou d'étude de résilience face à des incidents d'exploitation.
- ▶ L'étude d'architectures de pilotage du système cyber-physique plus décentralisées que celles traditionnellement employées, en s'intéressant notamment aux propriétés de résilience, à la cybersécurité et aux modalités d'exploitation.

Feuille de route « Virtualisation du contrôle-commande »

À l'instar des virages technologiques entrepris dans les secteurs des télécommunications et de l'automobile, les technologies de virtualisation des systèmes de contrôle-commande en temps réels vont trouver une transposition dans les réseaux électriques. Il s'agit de remplacer les équipements matériels par des applications logicielles qui s'exécutent sur une infrastructure logicielle de virtualisation, et sur des matériels communs. La virtualisation, véritable rupture technologique, doit permettre une réduction significative des équipements à installer, une simplification de l'ingénierie, une réduction des coûts d'exploitation et de maintenance par le télédiagnostic, la téléadministration et la télémaintenance.

Les travaux de R&D portés par cette feuille de route consisteront à :

- ▶ faire la démonstration, en laboratoire puis en conditions réelles, d'une solution de contrôle-commande de poste virtualisé, multifournisseurs, sur infrastructure de virtualisation open source²⁴, incluant des protections contre les défauts d'isolement ;
- ▶ caractériser les évolutions des processus métier adaptées à cette nouvelle solution et évaluer les gains technico-économiques sur le cycle de vie complet ;
- ▶ contribuer aux spécifications techniques d'un futur déploiement industriel de cette solution.

Si ces étapes sont concluantes, les projets d'implémentation industrielle de contrôle-commande virtualisé des systèmes de protections pourront être engagés dès la période 2029-2032.

Feuille de route « Maritime »

La feuille de route « Maritime » a pour principal objet d'explorer et d'optimiser les choix de design de RTE pour le raccordement de l'éolien offshore en grande profondeur. Pour cela, les travaux seront principalement focalisés sur un projet de démonstration, un projet d'étude et un projet de recherche amont :

- ▶ Le projet Rhodé qui vise à vérifier la faisabilité de raccordements flottants en HVDC 2 GW, en étudiant plus spécifiquement flotteurs, câbles dynamiques, électronique de puissance embarquée et équipements THT embarqués.
- ▶ L'étude des postes posés pour des profondeurs dépassant une centaine de mètres comme alternative au raccordement flottant.

- ▶ L'exploration d'un concept plus disruptif de raccordement en technologie à courant alternatif de forte puissance en utilisant des câbles supraconducteurs (« Supra Marine »).

En complément, la feuille de route intègre également des études pour comprendre, mesurer et atténuer le cas échéant l'effet des infrastructures de réseau maritimes sur la biodiversité marine et côtière. Cela inclut notamment l'étude et la démonstration d'une solution innovante pour atténuer la pollution sonore que provoque le battage (ou forage) des pieux de fondation ou de fixation des ancrages des plateformes en mer.

24. Projet SEAPATH (<https://ifenergy.org/projects/seapath/>)

4.7 Programme « Climat, Équilibre Offre-Demande et Réseau long terme » (CLER)

Le programme « Climat, Équilibre Offre-Demande et Réseau long terme » a pour vocation d'élaborer les connaissances, les méthodes et les outils pour les études technico-économiques de long-terme dans quatre dimensions : le climat, l'évolution de la consommation et des usages, les études d'équilibre offre-demande et d'adéquation du système électrique, les études d'adaptation et d'évolution du réseau.

Ce programme se compose ainsi de quatre feuilles de route :

- ▶ Climat, météo et impacts sur le système électrique
- ▶ Décarbonation, électrification et flexibilités de la consommation
- ▶ Modélisation Équilibre Offre-Demande Long-Terme
- ▶ Évolution du réseau

Feuille de route « Climat, météo et impacts sur le système électrique »

L'objectif de la feuille de route est de fournir à RTE les connaissances, méthodes, outils et données sur le climat actuel et son évolution future, et les impacts qui en découlent pour la gestion des infrastructures de réseau et, plus largement, du système électrique français et européen.

Pour cela, il s'agit notamment de maintenir à l'état de l'art les représentations du change-

ment climatique utilisées par RTE, en intégrant les progrès scientifiques et l'état des connaissances (y compris ce que la réalité climatique enseigne jour après jour), avec des approfondissements dans la compréhension des phénomènes de température des sols, d'inondations et d'événements combinés. Il s'agit aussi de contribuer à l'élaboration des diverses fonctions qui traduisent les paramètres climatiques en impacts pour la gestion du réseau.

Feuille de route « Décarbonation, électrification et flexibilités de la consommation »

L'objectif de la feuille de route est de développer des modèles et jeux de données permettant de caractériser et scénariser les évolutions à long terme des usages électriques (consommation annuelle en énergie, profil

horaire, localisation et capacités de flexibilité). Ces connaissances sont essentiellement employées dans les études prospectives et de planification de RTE : Bilan prévisionnel, SDDR, planification des raccordements...

Feuille de route « Modélisation équilibre Offre-Demande Long-Terme »

L'objectif de la feuille de route est de concevoir, maquetter puis développer de nouvelles méthodes et outils pour les études de prospective des systèmes énergétiques et d'adéquation entre infrastructures et usages, avec une granularité horaire, et qui aient notam-

ment la capacité de modéliser les nouveaux usages et technologies, de tenir compte de couplages entre vecteurs énergétiques et de produire des indicateurs de performance multicritères.

Feuille de route « Évolution du réseau »

L'objectif de la feuille de route est de concevoir, maquetter puis développer de nouvelles méthodes pour les études technico-économiques multi-situations du réseau de transport. Ces méthodes doivent permettre d'évaluer les besoins d'évolution des infrastructures de transport, les capacités de raccordement de nouveaux clients, ou encore les contraintes de planification de consignations pour les opérations de maintenance, en s'appuyant pour cela sur des

algorithmes de simulation et d'optimisation scientifiquement innovants, pour automatiser les calculs technico-économiques et représenter une complexité de phénomènes avec le meilleur équilibre entre vraisemblance et contraintes calculatoires. Parmi ces complexités, il s'agit notamment de modéliser de nouveaux usages tels que le stockage avec batteries, de tenir compte des flexibilités ou automatismes.

4.8 Programme « Environnement, société et prospective » (PEPS)

La finalité du programme « Environnement, société et prospective » est d'aider RTE à anticiper et à préparer le réseau et le système électriques français aux contextes futurs, en intégrant des exigences de durabilité et de résilience. Cela nécessite de développer des moyens d'analyse, de prospective et d'action avec une compréhension complète du système électrique : technique, économique, sociale et environnementale.

Ce programme se compose ainsi de six feuilles de route :

- ▶ Réseau et biodiversité
- ▶ Écoconception, analyses environnementales et de résilience
- ▶ Lignes Régénératives
- ▶ Énergie, réseau et société
- ▶ Flexibilité et régulation
- ▶ Système énergétique futur

Feuille de route « Réseau et biodiversité »

L'ambition de la feuille de route est d'améliorer la capacité de RTE à comprendre les interactions de l'infrastructure avec le paysage marin, les milieux et les organismes vivants, par des approches scientifiques rigoureuses et opposables. De plus, afin de développer des solutions de réseaux qui réduiront les impacts négatifs et contribueront à la régénération de la biodiversité, des nouveaux concepts de solutions et de pratiques sont explorés. La feuille de route est organisée selon trois domaines de biodiversité :

- ▶ en biodiversité marine, plusieurs thématiques sont abordées : l'effet des champs électromagnétiques sur la biodiversité marine en phase d'exploitation, l'amélioration des études d'impact environnemen-

tales, la compréhension des interactions entre les infrastructures et les écosystèmes ainsi que la caractérisation des risques liés aux pollutions.

- ▶ en biodiversité terrestre, les projets portent sur la caractérisation des effets des tranchées forestières et des postes électriques sur la biodiversité et la caractérisation des services environnementaux des emprises des tranchées forestières.
- ▶ concernant l'avifaune, l'objectif principal est de réduire les risques de collision des oiseaux avec les infrastructures électriques à travers une meilleure compréhension des interactions entre les infrastructures et l'avifaune ainsi que l'expérimentation de solutions innovantes.

Feuille de route « Écoconception, analyses environnementales et de résilience »

Dans un contexte global de dépassement des limites planétaires, cette feuille de route a pour objectif de développer des méthodes d'analyse, d'évaluation, de conception, de prise de décision qui intègrent des exigences

de durabilité et de résilience. En T7, elles seront appliquées et expérimentées en priorité à l'écoconception de designs d'assemblages matériels ou de procédés d'ingénierie de RTE.

Feuille de route « Lignes Régénératives »

Le concept de « Lignes Régénératives » consiste à intégrer des fonctions écologiques fondées sur la nature à nos projets de réseaux : régulation du cycle de l'eau, création de puits de carbone, renforcement des pollinisateurs et auxiliaires de culture, lutte contre les îlots de chaleur, les incendies, restauration des

continuités écologiques. L'objectif des travaux de R&D portés par cette feuille de route sera d'expérimenter l'intégration de telles fonction, d'évaluer l'accueil des parties prenantes territoriales, puis d'étudier les conditions techniques, économiques, de gouvernance pour que le concept puisse être industrialisé à l'échelle.

Feuille de route « Énergie, réseau et société »

Cette feuille de route vise à comprendre les relations entre l'énergie, le réseau et la société pour identifier les conditions de réussite de la transition énergétique. Les travaux couvrent trois champs :

1. La relation de la société aux infrastructures : comprendre les mécanismes d'opposition et d'adhésion aux infrastructures, et proposer une évolution des pratiques susceptibles de favoriser l'acceptation et donc la réussite du SDDR.
2. La prospective sociale de l'énergie, selon ces deux axes principaux :
 - ▶ les tendances lourdes de la consommation d'énergie, traitées par l'histoire de la prospective et de la planification de la consommation et par les normes sociales de consommation ;

- ▶ les conditions sociales de réduction de la demande, suite à l'étude Bilan Prévisionnel 2023, montrant que la sobriété est un pilier incontournable, et qu'on aborde par les formes et expériences de la sobriété, par la hiérarchisation des usages, par la relation à la demande en régime électrique contraint, par la justice énergétique comme condition du changement.

3. La planification et la territorialisation, en s'intéressant notamment à l'offshore, aux dynamiques de l'autoconsommation, à l'évolution du rôle des syndicats d'énergie et aux effets des COP régionales²⁵ sur l'aménagement du territoire et les projets de réseau.

Feuille de route « Flexibilité et régulation »

L'ambition de la feuille de route est d'étudier les mécanismes de régulation réglementaires et technico-économiques et leurs effets sur l'adéquation offre-demande à long terme et sur la soutenabilité du réseau de transport d'électricité. Les travaux couvrent quatre domaines :

- ▶ Développement de la flexibilité : identifier les conditions de développement et de mobilisation de la flexibilité et étudier, en collaboration avec l'écosystème externe,

les modèles de gouvernance et économiques pour assurer une gestion « harmonieuse » de la « duck curve ».

- ▶ Gestion des situations de stress et d'inaéquation structurelle entre l'offre et la demande : comprendre et anticiper les situations de stress d'adéquation entre l'offre et la demande, voire de délestage, au niveau français et européen et analyser l'effet de différents dispositifs de régulation envisageables pour en déduire des recommandations.

25. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/cop-regionales>

- ▶ Rentabilité des investissements : élaborer un mode opératoire pour évaluer la rentabilité des investissements, que ce soient des actifs de production ou de réseau, sous des hypothèses variées en termes de mix énergétique, de consommation et de schéma régulateur, en vue d'identifier les scénarii dans les études prospectives qui seraient par nature économiquement non soutenables ou instables, sauf à envisager des mécanismes de subventions nouveaux.
- ▶ Régulation et finance durable : anticiper les évolutions réglementaires européennes (CSRD...) et proposer des évolutions des modalités de financements de RTE (tarifs et autres).

Feuille de route « Système énergétique du futur »

L'objectif de la feuille de route est de bâtir une prospective du système électrique français dans un cadre d'analyse économique complet et cohérent. Pour y parvenir, la feuille de route est structurée en quatre axes articulés entre eux :

- ▶ Scénarisation quantitative : démographie, modes de vie, choix technologiques, réindustrialisation, politiques énergie et environnement ;
- ▶ Évolution structurelle de l'économie et de son empreinte énergétique et environnementale, en trajectoire, par modélisation « entrées-sorties » monétaire et physique ;

- ▶ Besoins énergétiques par vecteur et fonctionnement du système énergétique européen couplé : électricité, gaz, hydrogène, chaleur et implications sur le dimensionnement ;
- ▶ Fondamentaux des coûts et filières industrielles : besoins en matières, en capacités industrielles et chaînes d'approvisionnement.

La feuille de route porte également une activité de veille technologique qui alimente les précédents axes d'étude.

4.9 Programme « Partenariats, valorisation, transformation et stratégies transprogrammes » (PRISME)

Le programme « Partenariats, valorisation, transformation et stratégies trans-programme » a pour ambition de développer les partenariats scientifiques, technologiques, commerciaux nécessaires à l'accomplissement efficient des projets de R&D, de développer des connexions entre la recherche académique et les besoins industriels de RTE pour faire émerger de nouvelles solutions, de chercher

des opportunités de financements complémentaires et de promouvoir une vision urbanisée et la création de communs afin de coordonner et mutualiser les efforts de R&D. Il se compose de quatre feuilles de route :

- ▶ Partenariats et valorisation
- ▶ Normalisation
- ▶ Open Source
- ▶ Stratégies sur les outils d'aide à la décision

Feuille de route « Partenariats et valorisation »

Cette feuille de route a pour objectifs d'identifier et développer des opportunités de partenariats et d'aider à leur structuration et suivi. Ce faisant, les activités de R&D pourront être accomplies de manière efficiente en tirant pleinement parti de leviers de collaboration, de financements institutionnels complémentaires et d'une coordination avec l'écosystème externe. Cela consistera plus spécifiquement à :

- ▶ identifier les opportunités de partenariats pour des projets spécifiques en recherchant notamment des effets de levier (co-construction, co-financement) ;
- ▶ identifier les opportunités de participation à des consortiums bénéficiant de financements institutionnels (Horizon Europe,

France 2030...), participer à l'élaboration des dossiers de candidature, aux montages et suivis administratifs des projets ;

- ▶ harmoniser et améliorer les pratiques contractuelles et partenariales (gouvernance, propriété intellectuelle...) ;
- ▶ promouvoir des activités de R&D alignées sur les besoins de RTE dans les instances scientifiques, institutionnelles, industrielles appropriées ;
- ▶ disséminer et valoriser les résultats de R&D obtenus par RTE et, réciproquement, capter les avancées de l'écosystème externe, pour contribuer à une meilleure coordination sectorielle, au-delà des frontières de l'entreprise.

Feuille de route « Normalisation »

Cette feuille de route a pour ambitions d'identifier les principaux enjeux de normalisation pour l'accomplissement des missions de RTE, de coordonner la participation aux travaux de normalisation afin d'assurer qu'ils intègrent les besoins de RTE, et d'anticiper les exigences réglementaires normatives pour en maîtriser

les risques et faciliter la mise en conformité. Cela consistera plus spécifiquement à :

- ▶ asseoir la représentation de RTE dans les plus grandes instances de normalisation.
- ▶ mener des veilles technico-réglementaires et participer au développement des normes relatives aux matériels, pour anticiper

et influencer les prescriptions afin de réduire les risques de choix industriels non conformes ou financièrement pénalisants, et pour diminuer les coûts complets des infrastructures (simplification des achats, standardisation des spécifications, économies d'échelle, interopérabilité, optimisation de l'exploitation et de la maintenance) ;

- ▶ promouvoir la mise en œuvre de normes «équipements» et «méthodes» qui répondent aux enjeux de stabilité et de qualité de l'électricité, en particulier sur le grid forming ;
- ▶ promouvoir la mise en œuvre de normes pour de développement à l'échelle de flexibilités pour l'équilibrage du réseau, en particulier FlexReady.

Feuille de route « Open Source »

Cette feuille de route a pour ambition de consolider, développer et promouvoir la stratégie Open Source adoptée par RTE²⁶. Les objectifs de la feuille de route sont :

- ▶ poursuivre l'implication dans la gouvernance et le développement de la fondation LF Energy pour accroître, par l'adoption de bonnes pratiques Open Source et le développement des communautés, l'envergure, la solidité industrielle et la dynamique d'innovation des projets qui y sont hébergés ;

- ▶ fort des succès constatés, œuvrer pour l'émergence de collaborations Open Source nouvelles pour soutenir et optimiser les activités de R&D de la période TURPE 7 ;
- ▶ promouvoir la démarche de collaboration Open Source en interne et à l'externe par le retour d'expérience, la quantification des bénéfices et l'amélioration continue des pratiques.

Feuille de route « Stratégies sur les outils d'aide à la décision »

Cette feuille de route a pour vocation d'apporter des solutions méthodologiques et algorithmiques innovantes pour les applications opérationnelles d'aide à la décision (opérations en temps-réel, gestion prévisionnelle des actifs, développement de l'infrastructure réseau, laboratoire de tests, contrôle en boucle fermée...). Ces solutions concernent plus particulièrement quatre domaines – modélisation, simulation, contrôle, optimisation – lesquels nécessitent d'intégrer des connaissances scientifiques pluridisciplinaires (électrotechnique, économie, statistiques, intelligence artificielle, traitement du signal, automatique, mathématiques appliquées).

Plus spécifiquement, les activités intégrées à cette feuille de route consisteront à :

- ▶ élaborer une vision d'ensemble urbanisée des briques fonctionnelles et technologiques mises en œuvre dans les solutions numériques innovantes développées.
- ▶ définir et coordonner les travaux scientifiques dans les domaines Optimisation, Modélisation, Simulation, Contrôle et Intelligence Artificielle.
- ▶ établir et coordonner les collaborations scientifiques dans ces domaines.
- ▶ apporter l'expertise aux projets de R&D, et plus largement à RTE, sur les méthodes et algorithmes d'aide à la décision.

²⁶. <https://opensource.rte-france.com/>

Annexes



Échelle de représentation de la maturité des activités de R&D

Une échelle de maturité est définie pour suivre la progression de travaux de R&D réalisés par RTE. Elle s'appuie sur un niveau « TRL »²⁷ et un regroupement en quatre grandes phases selon le code couleur présenté dans le tableau ci-dessous :

Maturité	Technology Readiness Level (TRL)	
01. R&D Exploratoire	TRL 1	Veille, observation du principe de base
	TRL 2	Formulation du concept technologique
	TRL 3	Preuve expérimentale de conception
02. Maquettage et validation de concept	TRL 4	Validation de la technologie en laboratoire
	TRL 5	Validation de la technologie en environnement réel
03. Démonstration	TRL 6	Démonstration de la technologie en environnement réel
	TRL 7	Démonstration du système à l'échelle prototype en environnement opérationnel
04. Pré-industrialisation	TRL 8	Qualification d'un système complet
	TRL 9	Système réel démontré en environnement opérationnel

La transposition des niveaux de maturité aux types d'activités R&D menées à RTE est présentée ci-dessous :

R&D exploratoire

Preuve de concept sur des cas réduits. On s'intéresse à un domaine, on formule la question, on définit des bases de modélisation puis on mène de premiers tests sur des *toy problems*.

Maquettage et validation de concept

Validation en laboratoire sur des cas représentatifs du contexte opérationnel (ex : une simulation s'effectue à la R&D sur un cas réel). Les modélisations et tests exploratoires sont réalisés sur des problèmes réels mais sans sortir du laboratoire R&D. À ce stade, il n'y a pas encore la garantie que l'approche fonctionnera en environnement opérationnel.

Démonstration

Validation en contexte opérationnel. S'agissant d'un logiciel, on développe un prototype qu'on teste en environnement opérationnel (ex : test au Centre National d'Exploitation du Système (CNES) en *off line*). S'agissant d'une étude, on engage une étude tête de série (ex : *Futurs énergétiques*, mobilité électrique, hydrogène) avec de bonnes chances que les résultats puissent être publiés par RTE.

Pré-industrialisation

Validation opérationnelle complète et portage auprès des métiers. S'agissant d'un logiciel, on réalise des tests dont le succès permet la mise en production. S'agissant d'une étude, on capitalise l'étude tête de série et on réalise toutes les actions nécessaires (ex : documentation de la nouvelle méthodologie) pour qu'elle soit reproductible directement par les métiers sans intervention de la R&D.

Le budget de la régulation incitative de la R&D couvre les trois premières phases de maturité (TRL 1 à 7).

²⁷ L'échelle des *Technology Readiness Levels (TRL)* définit les niveaux de maturité technologique sur une échelle de 1 à 9. Elle fut initiée par la NASA et fait référence en recherche technologique.



Le réseau
de transport
d'électricité



RTE
Immeuble WINDOW - 7C Place du Dôme,
92073 PARIS LA DEFENSE CEDEX
www.rte-france.com