



**Grandes lignes du  
programme de R&D de RTE  
sur la période 2017-2020**

# Synthèse

**RTE publie les grandes lignes de son programme de R&D pour les années 2017 à 2020, programme dont l'objectif est de renforcer la capacité d'anticipation des grandes ruptures auxquelles RTE sera confronté.**

En effet, le contexte actuel est marqué par la concomitance certainement historique de mutations fortes, voire de révolutions : transition énergétique, numérisation de l'économie, attentes sociétales autour de l'environnement et de l'énergie. Dans le même temps, de nombreux progrès technologiques ouvrent de nouvelles perspectives : innovations dans le domaine des matériaux, des mathématiques appliquées, de l'informatique de pointe, des télécommunications ou de l'électronique de puissance.

Les mutations déjà identifiées en 2012 lors de la construction du programme de R&D précédent ont ainsi été confirmées et ont même connu une accélération importante au cours des dernières années : l'évolution massive des modes de production d'électricité vers les énergies renouvelables et la production décentralisée, la transformation numérique impactant l'ensemble de la chaîne de valeur du secteur électrique, et tout particulièrement les gestionnaires de réseaux avec l'émergence des smart grids et des possibilités nouvelles offertes par les mégadonnées (le « big data »), et la poursuite de l'intégration européenne.

En complément de ces évolutions, de nouveaux changements sont apparus ou se profilent :

- la place croissante donnée aux territoires, résultat d'évolutions réglementaires (loi MAPTAM), technologiques (smart grids) et sociétales (« consommer local ») ;
- les interactions croissantes entre les différents réseaux d'énergie et le besoin de développer des logiques multi-fluides / multi-énergies ;

- l'arrivée de solutions de stockage distribué matures ;
- enfin, des incertitudes marquées sur la viabilité et la pérennité du modèle économique actuel du secteur énergétique, plusieurs acteurs du secteur étant en grande difficulté partout en Europe.

Ce sont ainsi les fondements techniques, économiques et sociétaux du système électrique qui sont remis en cause sous l'effet de la transition énergétique et des nouveaux équipements de réseaux à base d'électronique de puissance et de technologies numériques.

Dans ce cadre, RTE doit donc poursuivre ses activités de R&D tournées vers l'amélioration des performances et la sécurisation des choix techniques : augmentation des capacités de transit des câbles et diminution des pertes, diminution des coûts de construction des lignes souterraines, qualification de nouvelles technologies pour en maîtriser les impacts avant de les déployer industriellement, élaboration d'outils avancés de simulation et d'optimisation pour développer et gérer le réseau en assurant au mieux sa sûreté, optimisation de la gestion des actifs, optimisation de l'utilisation des infrastructures par des mécanismes de marché, etc.

Cependant, face à l'ampleur des trois révolutions en cours (transition énergétique, mutation numérique et évolutions sociétales), les équipes R&D de RTE doivent, dans le même temps, renforcer leurs capacités d'anticipation et, pour cela, élargir leur champ d'étude au-delà des frontières du réseau du transport d'électricité : d'une part, la sûreté du système dépend de l'ensemble des équipements raccordés au réseau et, d'autre part il est aujourd'hui question de possibles évolutions intégrant massivement des éléments de stockage d'électricité, ou couplant les réseaux de différentes énergies (gaz, réseaux de chaleur).



RTE poursuit donc les travaux engagés lors de la première feuille de route sur la période 2013-2016 et en lance de nouveaux. Ainsi, les travaux de R&D de RTE pour la période 2017-2020 seront structurés en 6 programmes :

#### ■ LE PROGRAMME « GESTION DES ACTIFS »

Ce programme poursuit les activités engagées pour atteindre les phases d'utilisation des recherches lancées lors de la première feuille de route.

#### ■ LE PROGRAMME « ÉVOLUTION DE L'INFRASTRUCTURE DU RÉSEAU »

Ce programme poursuit les travaux lancés dans le cadre du programme « Réseaux du futur » avec un renforcement de la dimension éco-conception des équipements et de l'accroissement des technologies numériques pour réaliser leur contrôle commande, les protections et les plans de défense associés.

#### ■ LE PROGRAMME « ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ »

Ce programme sera renforcé par rapport au programme existant, notamment sur les dimensions éco-conception et biodiversité.

#### ■ LE PROGRAMME « FONCTIONNEMENT ET EXPLOITATION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE »

Ce programme poursuit d'une grande partie du programme « Système électrique » avec le double objectif, d'une part, de garantir le maintien de la sûreté du système face à l'ensemble des évolutions physiques qui conduisent à un véritable système électrique 2.0 (à base d'électronique de puissance) et, d'autre part, de faire évoluer fortement les outils d'exploitation du système en y intégrant des capacités de traitement et de visualisations de données massives.

#### ■ LE PROGRAMME « DÉVELOPPEMENT OPTIMAL DU RÉSEAU DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE »

Ce programme vise à repenser les méthodes et outils d'étude du développement de réseau dans le contexte de la transition énergétique, sociétale et numérique : mieux intégrer la transversalité exploitation/ maintenance/ gestion des actifs/ développement, et proposer le bon équilibre entre les infrastructures électriques et numériques dans le développement du système électrique 2.0.

#### ■ LE PROGRAMME « PROSPECTIVE, ÉCONOMIE ET SMART GRIDS »

Ce programme poursuit la dynamique lancée sur les smart grids, mais sera largement renforcé dans différentes dimensions complémentaires : études prospectives sur l'évolution du secteur électrique voire énergétique, veille active sur tous les sujets à l'interface du système électrique (power-to-gaz, véhicule électrique, etc.) et sur les évolutions sociétales (smart city, nouveaux modes de consommation), stockage, analyses économiques sur le fonctionnement des marchés et les problèmes de décisions d'investissement, et enfin recherche sur les offres que RTE peut, dans ce contexte, proposer aux territoires (régions et métropoles).

# Sommaire

## INTRODUCTION

6

La R&D de RTE dans le contexte de l'accélération des transitions énergétique et écologique et des mutations technologiques et sociétales

6

RTE, un acteur au cœur de la transition énergétique

6

RTE doit également intégrer la révolution numérique et l'évolution de la société sur les sujets de l'énergie et des grandes infrastructures

7

Les besoins de R&D pour RTE

8

## I. L'ÉVOLUTION DU CONTEXTE DEPUIS LA PRÉCÉDENTE FEUILLE DE ROUTE (2013-2016)

10

Les mutations déjà identifiées en 2013 se confirment et s'accroissent

11

La transition énergétique accélère le développement des EnR

11

Le déploiement des technologies du numérique offre un formidable terrain d'opportunités et rebat les cartes de l'organisation de la gestion du système

13

Les avancées de l'Europe de l'énergie influencent et influenceront les activités de RTE

14

La place du consommateur sera renforcée

15

De nouvelles mutations sont en cours et en gestation

16

De nouveaux engagements ont été pris en matière de transition écologique

16

La place nouvelle donnée aux territoires aura un impact sur les politiques de développement et l'exploitation des réseaux par RTE

17

L'Internet des objets et les nouveaux systèmes de communication ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'exploitation et de la gestion des actifs

17

L'architecture des marchés de l'électricité est remise en cause

18

Les premières solutions de stockage distribué pourraient commencer à se diffuser

19

Intelligence artificielle et apprentissage automatique : des bénéfices potentiels importants pour RTE

20

<b>Le programme « Gestion des actifs »</b>	<b>24</b>	<b>Le programme « Fonctionnement et exploitation du système électrique »</b>	<b>48</b>
<b>Les enjeux</b>	<b>24</b>	<b>Les enjeux</b>	<b>48</b>
<b>Les axes de recherche</b>	<b>25</b>	<b>Les axes de recherche</b>	<b>49</b>
Observer les ouvrages, les instrumenter et les rendre communicants	26	Concevoir l'architecture de pilotage du réseau électrique du futur	50
Construire et valoriser l'imagerie numérique du réseau	27	Intégrer dans le système électrique les nouveaux leviers de flexibilité	51
Expérimenter et modéliser pour prédire le comportement des équipements et du réseau	28	Optimiser l'exploitation du système	52
Développer des méthodes et des outils d'aide à la décision pour la gestion des équipements de RTE	29	Maîtriser la stabilité du système dans un réseau en mutation	54
<b>Le programme « Évolutions de l'infrastructure de réseau »</b>	<b>30</b>	<b>Le programme « Développement optimal du réseau de la transition énergétique »</b>	<b>56</b>
<b>Les enjeux</b>	<b>30</b>	<b>Les enjeux</b>	<b>56</b>
<b>Les axes de recherche</b>	<b>31</b>	<b>Les axes de recherche</b>	<b>57</b>
Améliorer l'efficacité énergétique des liaisons	32	Assurer une meilleure optimisation globale entre développement, maintenance et exploitation	58
Préparer les nouvelles générations de poste électrique	34	Renforcer la R&D sur les méthodes et outils pour le développement du système	60
Préparer l'arrivée des réseaux maillés en courant continu	36		
Adapter le contrôle-commande, les protections et les principes de défense du réseau aux nouveaux enjeux et risques associés	38		
<b>Le programme « Environnement et Société »</b>	<b>40</b>	<b>Le programme « Prospective, économie et Smart Grids »</b>	<b>62</b>
<b>Les enjeux</b>	<b>40</b>	<b>Les enjeux</b>	<b>62</b>
<b>Les axes de recherche</b>	<b>41</b>	<b>Les axes de recherche</b>	<b>63</b>
Lutter contre le changement climatique, gérer durablement les ressources et prévenir les pollutions	42	Développer une vision prospective du secteur électrique et énergétique et questionner le modèle économique	64
Capoter les facteurs sociétaux interférant avec le choix de nos solutions	44	Proposer de nouvelles architectures de marché et de nouveaux schémas réglementaires	65
Participer à la protection de la biodiversité et des services rendus par les écosystèmes	46	Définir les technologies et les modèles économiques pertinents de stockage pour RTE et le système électrique	66
		Comprendre et accompagner la stratégie énergétique des territoires et leur proposer de nouveaux services	68
		Quantifier la valeur technico-économique des nouvelles flexibilités testées sur le système électrique	70

# Introduction

## La R&D de RTE dans le contexte de l'accélération des transitions énergétique et écologique et des mutations technologiques et sociétales

### RTE, un acteur au cœur de la transition énergétique

Après une période de lancement, qui visait notamment des objectifs pour 2020, la transition énergétique est désormais au cœur des politiques publiques en matière d'énergie. Cela est vrai tant à l'échelon européen, puisque l'Union européenne s'est dotée d'objectifs clairs pour 2030, qu'à l'échelon français avec la loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015.

**La transition énergétique a des impacts immédiats et directs sur l'ensemble des champs de responsabilité de RTE :**

#### **Le développement et la gestion du réseau d'électricité à très haute tension**

La transformation du mix énergétique (fermeture des centrales au charbon, fermeture programmée de la centrale nucléaire de Fessenheim dès lors que la centrale EPR de Flamanville sera mise en service, développement soutenu des énergies solaire et éolienne notamment sur le réseau de distribution qui entraîne des baisses de soutirages sur le réseau de transport, cible de baisse de la part du nucléaire de 75 % à 50 % en 2025, développement des interconnexions et du marché unique) entraîne une modification importante des flux d'électricité. Le développement des énergies renouvelables (EnR) devant s'adapter aux atouts de chaque territoire, cette évolution des flux s'observe tant à l'échelon régional (le parc éolien est pour l'essentiel au nord du pays, le parc photovoltaïque au sud) qu'à l'échelon européen (les énergies marines sont au nord-ouest, le potentiel éolien important dans les îles britanniques, le photovoltaïque au sud, etc.).

## La sécurité d'approvisionnement

L'évolution rapide du parc de production, le caractère fortement intermittent des énergies renouvelables, le développement de la gestion active de la demande ou encore de capacités de stockage posent régulièrement la question, d'une part, de la bonne adéquation du niveau des capacités de production à l'évolution de la demande et, d'autre part, de la flexibilité du réseau pour acheminer cette électricité à la fois à un échelon national mais aussi de plus en plus européen ;

## L'équilibre production-consommation en temps réel

RTE est responsable de l'équilibre production-consommation en temps réel. Il est également garant de la stabilité et du bon fonctionnement du système électrique. Mais les conditions de cet équilibre changent radicalement : plus grande participation des consommateurs à la gestion dynamique du système, EnR qui participent moins aux services système, équipements connectés au travers de l'électronique de puissance donc sans inertie mécanique. L'ensemble des règles, mais aussi des principes de fonctionnement technique, permettant à RTE d'assurer cette mission de sûreté du système doivent évoluer ;

## L'accompagnement de la définition des politiques publiques de l'énergie et de l'ensemble des acteurs du système énergétique européen

A l'heure où l'ensemble du secteur électrique, et même énergétique, évolue très rapidement, et dans différents cercles (national, européen, régional voire local), l'expertise de RTE sur le système électrique français et européen doit être pleinement mise au service des politiques publiques de l'énergie : sur les conditions de raccordement et sur l'évolution nécessairement concertée entre développement de la production et développement du réseau, sur la sécurité d'approvisionnement, sur les mécanismes de marché les mieux à même de permettre l'investissement dans les moyens nécessaires au système énergétique du futur et la meilleure utilisation des moyens existants. L'objectif est de révéler tout le potentiel de chaque acteur du système électrique, sous contrainte d'une maîtrise des coûts de développement et d'exploitation de l'ensemble de ce système.

RTE doit également intégrer la révolution numérique et l'évolution de la société sur les sujets de l'énergie et des grandes infrastructures

Cette transition énergétique, déjà fondamentale pour les activités de RTE, arrive dans une période marquée par deux autres révolutions :

— une mutation technologique forte, marquée notamment par la numérisation généralisée de tous les équipements, et l'extension des possibilités de télécommunications entre ces équipements. Cela ouvre la voie par exemple à de nouvelles façons de gérer le réseau ou de suivre le vieillissement des équipements, mais aussi à une plus grande facilité d'accès aux informations, en interne et en externe, qui viendra modifier le périmètre d'activités de différents acteurs ;

— et des évolutions sociétales qui affectent directement la mission de RTE sur le sujet des services rendus par les ouvrages de transport, et qui modifient plus fondamentalement le rapport des consommateurs à l'énergie et au rôle qu'ils entendent jouer dans le système électrique, à la fois dans son développement et dans sa gestion quotidienne. D'autant que là encore, les technologies numériques et les communications par internet viennent radicalement changer la donne en rendant économiquement envisageable des schémas de participation d'acteurs individuels qui étaient, par le passé, bien trop coûteux au regard des enjeux. Et cette dynamique est renforcée par le fait que les aspirations de certains acteurs ne sont pas guidées par la seule rentabilité économique, et par le fait que ces acteurs considèrent des externalités personnelles (éléments de confort, sentiment de participer à la lutte contre le changement climatique) ou collectives (emploi local, image...).

Ces trois évolutions concomitantes conduisent ainsi à l'apparition de nouvelles opportunités, tant pour les activités internes de RTE que pour son positionnement vis-à-vis de différents acteurs externes, à commencer par ses clients. Elles conduisent également à la remise en cause et au besoin d'évolution rapide des pratiques de RTE.

## Les besoins de R&D pour RTE

Les activités de R&D de RTE ont toujours été tournées vers l'amélioration de ses performances et la sécurisation de ses choix techniques : augmentation des capacités des transits des câbles, diminution des coûts de construction des lignes souterraines, qualification de nouvelles technologies pour en maîtriser les impacts avant de les déployer industriellement, développement d'outils avancés de simulation et d'optimisation pour développer et gérer le réseau en assurant au mieux sa sûreté, optimisation de l'utilisation des infrastructures par des mécanismes de marché, etc.

Cependant, face aux trois révolutions en cours (transition énergétique, mutation numérique et évolutions sociétales), ce sont les fondamentaux de l'organisation actuelle du système électrique qui sont remis en cause : fondamentaux techniques et structurels sous l'effet de la transition énergétique et des nouveaux équipements de réseaux tout d'abord, fondamentaux organisationnels ensuite en raison de la remise en cause des processus de prises de décision du fait de la numérisation et de la disponibilité de nouvelles informations à de nouvelles échelles de temps.

Face à autant de défis, les équipes R&D de RTE doivent développer de nouveaux champs d'investigation, d'une part, en étudiant la façon dont les activités de RTE peuvent évoluer pour tirer parti des nouvelles possibilités techniques, sans perdre de vue la nécessaire sobriété de moyens et le délai court de réaction à associer à ces évolutions et, d'autre part, en s'adaptant au contexte d'évolution du système électrique dans son ensemble.

Ce travail d'élargissement et d'approfondissement du champ de la R&D a été initié lors de l'établissement de la première feuille de route de la R&D, pour la période 2013-2016 :

- le contexte de transition énergétique avait conduit à lancer des activités de recherche de fond pour préparer les réseaux du futur devant permettre l'intégration massive des énergies renouvelables : développer les flexibilités du réseau pour gérer l'intermittence, passer d'une politique de sûreté uniforme à une politique équitable en fonction des besoins, développer de nouveaux modes de gestion de l'équilibre production-consommation sans bénéficier de l'inertie des centrales classiques mais avec de l'électronique de puissance, etc.
- les activités historiques d'étude et de validation des nouvelles technologies d'équipements de réseau avaient également été renforcées, en se plaçant à long terme pour prendre la pleine mesure de l'impact des difficultés de fonctionnement des réseaux à courant continu, ou de la généralisation de l'électronique de puissance.

Plusieurs activités ont également été lancées ou infléchies :

- un programme de recherche pour développer de nouvelles méthodes de gestion des actifs, fondées sur une collecte d'informations plus individualisées sur l'ensemble des équipements du réseau et leur traitement par des algorithmes d'optimisation ;
- un programme Environnement, qui continue d'explorer l'ensemble des impacts environnementaux de RTE, et de proposer des solutions pour limiter les impacts négatifs et en valoriser les aspects positifs comme le développement des emprises du réseau favorables à la biodiversité ;
- un programme Smart grids, qui a permis, au travers de la participation à de nombreux démonstrateurs, de bien percevoir les nouveaux modèles d'évolution des systèmes électriques à la maille locale, et de développer la feuille de route « Réseaux Électriques Intelligents » dans le cadre du plan éponyme de la nouvelle France industrielle. Ce programme a été complété par un projet de « Poste intelligent » consistant à numériser totalement le contrôle-commande de plusieurs postes d'une zone à fort développement éolien et à identifier toutes les fonctionnalités réalisables sur cette base ;
- le pilotage, la coordination et l'animation des experts travaillant en pré-normalisation (essentiellement le Conseil international des grands réseaux électriques – CIGRE) et normalisation (la Commission électronique internationale (IEC) et le Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique (CENELEC)) notamment par l'établissement de notes de stratégie en normalisation sur un horizon de temps à 3 à 5 ans. Cette organisation est devenue nécessaire du fait de l'évolution de travaux de normalisation beaucoup plus transversaux que dans le passé et avec une vision beaucoup plus prospective (des documents normatifs de solution à venir sont publiés, ce qui n'était pas le cas précédemment).

C'est donc en partant de cette situation d'une R&D qui a lancé des initiatives importantes et d'un contexte qui continue d'évoluer fortement que se construit la nouvelle feuille de route R&D pour les années 2017-2020.



# I.

## L'évolution du contexte depuis la précédente feuille de route (2013-2016)

**Différentes mutations, déjà identifiées lors de la construction du programme de R&D pour la période 2013-2016, ont connu une accélération importante au cours des dernières années :**

- l'évolution massive des modes de production d'électricité vers les énergies renouvelables et la production décentralisée ;
- la transition énergétique marquée par un volontarisme politique plus fort sous-tendu par une aggravation des constats relatifs à l'urgence d'agir pour le climat, tant au niveau européen que national, se traduisant par un nouveau cadre législatif et réglementaire ;
- le renforcement de l'intégration du marché européen de l'électricité, avec l'Union de l'énergie lancée par la Commission européenne en 2015.

En complément de ces évolutions, de nouveaux changements sont apparus ou se profilent :

- la place croissante donnée aux territoires, résultat d'évolutions législatives (par exemple, loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles du 27 janvier 2014 dite loi MAPTAM), technologiques (smart grids) et sociétales (« consommer local ») ;
- l'extension de la révolution digitale au secteur de l'énergie (internet des objets, big data, intelligence artificielle, etc.) ;

- des incertitudes marquées sur la viabilité et la pérennité du modèle économique actuel du secteur énergétique, plusieurs acteurs du secteur étant en grande difficulté partout en Europe ;
- l'arrivée de solutions technologiquement matures de stockage sans contrainte de localisation ;
- les interfaces croissantes entre les différents réseaux d'énergie et le besoin de développer des logiques multi-fluides / multi-énergies ;
- la transition écologique qui implique d'autres manières de développer, maintenir et exploiter les réseaux d'énergie ;
- enfin, la fréquence des aléas extrêmes, et plus globalement des menaces relatives aux changements climatiques, aux bugs informatiques, à la cybersécurité et à la dimension terroriste.

Des mutations technologiques, économiques et sociétales profondes sont donc en cours. Elles auront un impact sur la consommation d'électricité en France, sur les installations de production, sur l'implication des consommateurs et, in fine, sur l'ensemble des métiers de RTE, voire sur le rôle même de RTE. Le programme R&D pour la période 2017-2020 s'inscrit dans cette dynamique de changement pour donner à RTE les moyens de jouer un rôle moteur dans l'évolution du réseau de transport d'électricité en Europe.

## Les mutations déjà identifiées en 2013 se confirment et s'accroissent

### La transition énergétique accélère le développement des énergies renouvelables

#### La loi sur la transition énergétique fixe des objectifs précis en matière de développement des énergies renouvelables

La transition énergétique, encore balbutiante en 2013 au niveau national, est désormais dans sa phase de mise en œuvre avec des objectifs précis et chiffrés votés dans le cadre de la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte de 2015 (LTECV) :

- réduction de la facture énergétique de la France (70 milliards d'euros d'importations en 2014) ;
- lutte contre les émissions de gaz à effet de serre en particulier en :
  - ▣ divisant par deux la consommation totale d'énergie du pays d'ici à 2050<sup>1</sup> ;
  - ▣ réduisant de 30 % en 2030 l'énergie tirée des énergies fossiles<sup>2</sup> ;
  - ▣ portant à 23 % en 2020 et 32 % à horizon 2030 la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie. Pour parvenir à cet objectif, les énergies renouvelables doivent notamment représenter 40 % de la production d'électricité en 2030 ;
  - ▣ réduisant de 40 % les émissions de gaz à effet de serre en 2030<sup>3</sup> ;
- passage de la part du nucléaire dans le mix électrique à 50 % en 2025.

#### Le développement des énergies renouvelables constitue un défi pour RTE

Le développement des énergies renouvelables en Europe sera le principal moteur du développement du réseau d'électricité d'ici 2030<sup>4</sup>. Le schéma décennal de RTE (édition 2015) annonce que plus de 10 milliards d'euros seront investis dans les 10 ans à venir pour adapter le réseau de transport français aux mutations du mix énergétique. Selon les scénarios, le taux de pénétration des énergies renouvelables en 2030 sera situé entre 40 % et 60 % et la cible européenne de long terme demeure inchangée : quasi-décarbonation de l'économie européenne à l'horizon 2050.

1 Réduction de la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à l'année de référence 2012

2 Réduction de 30 % de l'énergie tirée des énergies fossiles en 2030 par rapport à l'année de référence 2012

3 Réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030

4 ENTSO-E, "Ten-Year Network Development Plan 2016"



#### PREMIER DÉFI : LE CARACTÈRE VARIABLE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Pour RTE, en raison de leur caractère variable, l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau d'électricité est un véritable défi tant au niveau de la gestion des infrastructures que du pilotage en temps réel des flux d'énergie.

Pour cela, outre les méthodes et outils de prévision de production d'EnR, émergent peu à peu différents leviers de flexibilité, amenés par les acteurs de marchés et par les nouveaux composants de l'infrastructure du réseau d'électricité et son contrôle-commande, qui permettront de s'accommoder de cette variabilité. Parmi ces leviers, on peut citer :

- l'utilisation du réseau à grande échelle comme moyen de lissage (foisonnement dans les grands systèmes) ;
- la gestion dynamique de la consommation ;
- une utilisation optimisée des réseaux, en les exploitant au plus près des limites et en prenant un minimum de marges préventives, grâce à une pleine utilisation de l'ensemble des variables de contrôle du réseau (topologie, gestion des transits et de la tension, etc.) ;
- la mise en œuvre de stratégies de stockage d'électricité ;
- une mutualisation des différents réseaux d'énergie.

Des défis d'intégration de ces différents leviers, qui ne sont pas exclusifs les uns des autres, se poseront dans un futur proche pour le gestionnaire du réseau de transport, en particulier pour définir les modalités de priorisation et d'activation de ceux-ci.



## DEUXIÈME DÉFI : LE CARACTÈRE DÉCENTRALISÉ DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les énergies renouvelables (à l'exception des éoliennes offshore) s'insèrent majoritairement dans le réseau de manière décentralisée : des microsites de production vont se généraliser, se superposant parfois aux sites de consommations (particulièrement pour la production photovoltaïque). Les réseaux de distribution d'électricité sont et seront de plus en plus bidirectionnels. Cela pose la question de la bonne coordination des contraintes locales et des équilibres globaux qui permettent le foisonnement, d'autant que le système électrique français est historiquement l'un des plus centralisés et que la cible de réduction de la part du nucléaire à 50 % en 2025 peut modifier radicalement la situation.

Dans le même temps, il existe d'importants gisements d'EnR en Europe qui ne sont pas équirépartis et sont souvent situés loin des centres de consommation (énergies marines bien sûr, mais aussi éoliennes terrestres souvent). La question de l'adaptation nécessaire du réseau européen de grand transport à cette nouvelle donne se pose donc de manière prégnante, comme l'attestent les différents schémas décennaux du Réseau européen des gestionnaires de réseau de transport d'électricité (European Network of Transmission System Operators for Electricity – ENTSO-E) (les TYNDP<sup>5</sup>), et aussi à plus long terme le projet de recherche e-Highways 2050<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Ten-Year Network Development Plan

<sup>6</sup> Projet qui avait vocation à définir le réseau européen utile à la gestion du système électrique

dans différents scénarios prospectifs pour 2050, en facilitant les échanges d'électricité entre les pays européens

## TROISIÈME DÉFI : LE FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Les EnR ne convertissent pas l'énergie mécanique en énergie électrique de la même façon que les centrales classiques, dont la rotation des alternateurs crée la fréquence du réseau. Elles sont raccordées au réseau au travers de l'électronique de puissance, ce qui offre beaucoup de possibilités de réglage, mais vient modifier les fondements du fonctionnement du système électrique qui s'appliquent depuis un siècle.

Ce changement ainsi que la perspective de mix énergétiques constitués massivement d'EnR induisent trois questionnements fondamentaux :

- la question de la tenue de fréquence, d'une nouvelle conception des réglages primaires et secondaires et à terme peut-être aussi la redéfinition de l'interprétation de la fréquence comme signal traduisant l'état des systèmes électriques ;
- la question de la cohérence, des interactions, ainsi que du fonctionnement optimal entre tous ces équipements d'électronique de puissance intégrés dans un grand système : les phénomènes dynamiques d'écroulement de fréquence, de tension, d'oscillations ont été étudiés depuis longtemps et en détails pour les systèmes « classiques ». Il faudra de nombreuses années d'études pour garantir le bon fonctionnement d'un système fondé sur la généralisation de ces nouveaux équipements, tant pour les EnR que pour les liaisons à courant continu et les équipements connectés au réseau chez les consommateurs. Il conviendra aussi de définir le chemin qui permet une transition fluide et sûre d'un système « classique » à un système « 100 % électronique de puissance » ;
- les fondations même du développement du réseau de transport d'électricité sont également remises en cause puisque la pratique actuelle est de valoriser ces investissements par des coûts d'exploitation évités au niveau des moyens de production. Que devient cette logique dans un système avec des EnR ayant des coûts marginaux nuls et des temps de développement des projets bien inférieurs à ceux des ouvrages de transport ?



## Le déploiement des technologies du numérique offre un formidable terrain d'opportunités et rebat les cartes de l'organisation de la gestion du système

Actuellement, la maîtrise du système électrique s'appuie sur trois couches superposées : la couche physique avec les équipements, la couche logique permettant l'optimisation du système et la couche virtuelle permettant l'interaction entre RTE et les acteurs de marché.

Ce modèle en trois couches, gérées pour le moment en relative indépendance et avec des relations deux à deux, est remis en cause par plusieurs dynamiques :

- l'intégration d'éléments numériques dans les couches physiques ayant des comportements liés à la couche logique (algorithmes de commande) plutôt qu'à des lois physiques et pouvant être commandés par d'autres acteurs que les gestionnaires de réseaux ;
- une plus grande incertitude sur la nature et la pérennité des besoins de développement de réseau, qui peut amener à privilégier certaines options d'exploitation plutôt que d'autres, ou l'investissement dans des solutions de flexibilités plutôt que dans des lignes ;
- la volonté d'une gestion plus dynamique des réseaux de distribution, ou d'équilibres à une maille régionale, qui pourrait conduire à ce que certaines données soient utilisées autant pour la couche marché que pour la couche logique, même à une maille régionale.

Ces dynamiques impliquent de penser la gestion du système de manière transversale entre les différentes activités de RTE (développement, maintenance, exploitation), et de définir de nouveaux modes de coordination entre elles.

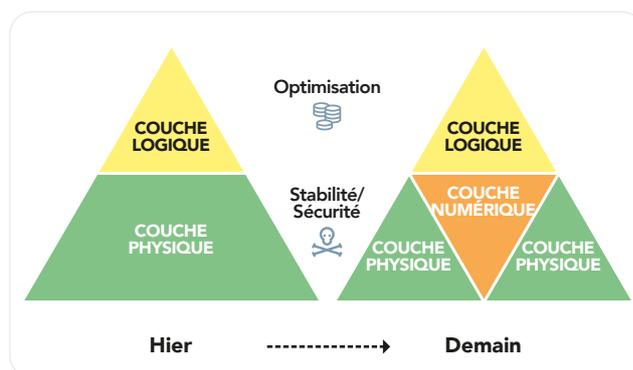
En effet, le déploiement des technologies du numérique offre des possibilités remarquables pour répondre aux enjeux du système électrique de demain, mais vient percuter ce modèle en couches : la pyramide « intelligence centralisée vs réseau physique réparti » peut devenir caduque.

Les interactions entre les couches logique et physique deviennent plus importantes, offrant ainsi des opportunités intéressantes :

- hybridation plus forte des équipements et des matériels avec les technologies de l'information (rapprochement entre couche physique et couche numérique) permettant ainsi de déployer de l'intelligence localement/d'automatiser la gestion de la couche logique du réseau (c'est le concept de l'industrie 4.0) ;
- interactions plus fortes entre la couche virtuelle et la couche physique permettant à moindre coût de piloter les usages (physiques) directement depuis la couche virtuelle (par exemple dans une logique de marché).

Ces évolutions doivent se faire en garantissant la robustesse du service offert par RTE quels que soient les aléas associés ou concomitants à cette nouvelle complexité, et ce, notamment en identifiant les risques de ruptures en approvisionnement de métaux précieux et ressources rares nécessaires à ces avancées technologiques.

Les technologies du numérique peuvent donc rendre des services à différents acteurs et la question de la priorisation de ces services et du partage de la valeur créée entre les acteurs se pose donc.



## Les avancées de l'Europe de l'énergie influencent et influenceront les activités de RTE

À l'issue du Conseil européen des 23 et 24 octobre 2014, de nouveaux objectifs ont été fixés à l'horizon 2030, confirmant, au-delà de 2020, la volonté stratégique de l'Union européenne de s'inscrire dans la transition énergétique :

- réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 % par rapport aux niveaux de 1990 ;
- augmentation de la part des énergies renouvelables pour parvenir à au moins 27 % de l'énergie finale à l'horizon 2030 ;
- amélioration de l'efficacité énergétique d'au moins 27 %<sup>7</sup>.

Mais surtout, la Commission européenne a fixé, dans ses priorités, la création d'une Union de l'énergie, dont trois communications publiées le 25 février 2015, précisent le contenu :

- cinq priorités sont fixées : sécurité énergétique, marché intégré de l'énergie, efficacité énergétique, décarbonisation de l'économie, recherche innovation et compétitivité ;
- un ensemble de 15 plans d'actions est lancé, dont un sur la recherche et l'innovation ;
- l'outil de pilotage de la R&D européenne est remis à jour, avec une vision plus intégratrice (« Integrated SET Plan »).

Parmi les actions envisagées pour renforcer le marché intégré de l'énergie et la sécurité d'alimentation, la Commission européenne ambitionne de renforcer la collaboration et la coordination entre les gestionnaires de réseaux de transport (GRT). D'après les publications de fin 2015, un des maillons de ce dispositif<sup>8</sup> pourrait être les Centres opérationnels régionaux (Regional Operational Centres - ROC), qui coordonneraient le pilotage du réseau de façon centralisée sur un ensemble de pays (une région au sens européen) et confieraient au ENTSO-E la définition des scénarios de développement des réseaux dans une approche européenne très descendante.

Même si le schéma finalement proposé par la Commission européenne ne sera connu qu'en fin d'année 2016, le renforcement de la coopération inter-GRT vers des prises de décisions partagées est une tendance de fond à laquelle RTE et sa R&D ont déjà largement contribué via notamment le couplage des marchés, le lancement des centres de coordination (CORESO



pour RTE), les calculs de capacités coordonnées de type Flow Based<sup>9</sup> et les différents projets de recherche européens impliquant plusieurs GRT européens.

La R&D de RTE joue un rôle majeur sur ce sujet en proposant des concepts, en fournissant les outils qui permettent de les qualifier (démarche de prototypage) mais aussi en fournissant aux centres de coordination certains des outils/services industriels innovants dont ils ont besoin.

Au-delà de l'exploitation du réseau, cette plus forte coordination des prises de décision devra s'appuyer sur une vision partagée entre GRT de l'évolution du système électrique européen et de ses fondamentaux technico-économiques. Pour RTE, il s'agit donc de se préparer à davantage de collaboration, voire de centralisation, pour la réalisation des études d'adéquation et de développement du réseau de transport. En arrière-plan de cette tendance, se pose la question des méthodes et logiciels d'étude qui seront employés. La feuille de route R&D comporte d'ores et déjà des travaux visant à prendre en compte plus précisément la dimension européenne dans les méthodes et outils mis en œuvre par RTE (Bilan prévisionnel par exemple). En outre, plusieurs initiatives ont été engagées avec des GRT partenaires pour mettre en œuvre, dans un cadre bilatéral, voire multilatéral, des études pilotes communes (le projet européen e-Highway2050 en est un exemple réussi). La diffusion des outils devra néanmoins être renforcée à l'avenir, avec pour enjeu stratégique de faire converger les pratiques et positions dans le but de construire, entre GRT européens, une fonction d'étude coordonnée au niveau européen qui soit crédible.

<sup>7</sup> Par rapport aux scénarios de consommation future d'énergie, sur la base des critères actuels.

<sup>8</sup> Options for future European Electricity System Operation, European Commission, Décembre 2015.

<sup>9</sup> Couplage de marché fondé sur les flux : nouveau modèle de calcul et d'allocation des capacités d'échanges d'électricité disponibles aux interconnexions entre la France, le Benelux et l'Allemagne qui permet d'optimiser les échanges transfrontaliers d'électricité et de faciliter l'intégration des énergies renouvelables

## La place du consommateur sera renforcée

Les autorités européennes et nationales ont encore récemment fait part de leur volonté de placer le consommateur au centre des évolutions à venir du système électrique. Ce positionnement résulte de la conjonction de plusieurs éléments :

— au plan européen, la libéralisation du secteur électrique avait pour ambition initiale de réduire les coûts au bénéfice du consommateur final. La réalité des fondamentaux économiques (renchérissement des matières premières durant les années 2000, et particulièrement de l'énergie, investissements dans les nouvelles technologies de la transition énergétique, morcellement de la chaîne de valeur) a eu raison de cette promesse. La Commission européenne souhaite désormais davantage montrer au citoyen européen les bienfaits de la politique européenne de l'énergie. Elle souhaite pour cela le placer au



centre (« consumer centric approach ») des évolutions à venir. Il s'agit bien d'une ambition politique. À ce titre, le discours prononcé par Dominique Ristori, Directeur général de l'Énergie de la Commission européenne, lors de l'Assemblée générale 2015 d'ENTSOE est très éclairant : au-delà des raisons techniques qui militent pour renforcer la place du consommateur européen (renforcement de la flexibilité notamment), la Commission européenne souhaite s'appuyer sur les succès de la politique énergétique européenne pour réenchanter le rêve européen ;

— au plan national, les évolutions législatives et réglementaires successives du secteur de l'énergie visent à renforcer la place du consommateur (client final ou gros clients industriels), que ce soit en termes de droits sur les informations disponibles, ou de possibilités nouvelles offertes pour participer à l'équilibre du système électrique (interruptibilité, mécanisme d'ajustement, marché de l'énergie). Ces évolutions traduisent, d'une part, la volonté des pouvoirs publics français de maintenir la compétitivité des industries électrointensives nationales, concurrencées par d'autres pays européens – Allemagne en tête – et, d'autre part, d'associer davantage le consommateur français, de plus en plus investi sur les questions énergétiques ;

— le développement des compteurs communicants rend possible, tout comme les objets connectés, une participation active des consommateurs résidentiels dans la gestion de l'énergie. Au-delà de l'aspect comptage, la prolifération des objets connectés ouvre des horizons nouveaux en termes de pilotage des consommations, avec des coûts de mise en œuvre marginaux très faibles ;

— les consommateurs sont de plus en plus nombreux à prendre une place active dans le système électrique. Au-delà de la croissance toujours forte de l'autoconsommation et du nombre de « consomm'acteurs », de nouvelles organisations possibles du secteur apparaissent : des échanges d'énergie à une maille plus locale sont désormais envisagés par certains. Dans ces schémas nouveaux d'organisation, avec soit des marchés locaux d'énergie, soit de nouvelles formes d'échanges d'énergie de pair à pair, le gestionnaire du réseau de transport n'est plus l'unique contrepartie physique des échanges. Quelle serait la place nouvelle de RTE dans ce paysage ?

## De nouvelles mutations sont en cours ou en gestation

**Au-delà de la confirmation, et même de l'accélération des tendances déjà identifiées en 2013, le contexte actuel dans lequel RTE évolue est marqué par de nouveaux éléments de rupture :**

- la transition écologique qui prolonge la transition énergétique ;
- la place nouvelle donnée aux territoires dans la législation française ;
- la généralisation de l'internet des objets, notamment son développement dans le domaine industriel (IoT industriel) ;
- la remise en cause des modèles de marché de l'électricité au-delà de la question de la sécurisation de la pointe de consommation ;
- la baisse des coûts des solutions de stockage qui les rendent susceptibles de se développer rapidement ;
- le développement massif des véhicules électriques et des stations de recharge ;
- et enfin sur le plan technique et scientifique, les techniques d'utilisation de grandes masses de données qui deviennent matures et pouvant être pleinement utilisées. Il convient également de noter les progrès importants réalisés dans les domaines de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique qui pourraient trouver des champs d'application importants à RTE, en particulier pour l'exploitation du système.

## De nouveaux engagements ont été pris en matière de transition écologique

La transition énergétique s'insère dans un mouvement plus global de transition écologique et de préservation de l'environnement :

- adaptation et lutte contre le changement climatique ;
- respect de la biodiversité ;
- contraintes plus fortes de réduction des émissions polluantes (oxydes d'azote, particules, etc.) ;
- plans d'urbanisation plus soucieux de la consommation d'espace et de l'esthétique paysagère ;
- enjeux de réduction des pressions sur les ressources de matières premières et de valorisation des déchets : plan déchet 2014-2020 et transition vers une économie circulaire (loi de transition énergétique pour la croissance verte, directive européenne sur l'Écoconception, etc.).

A titre d'exemple, la loi de transition énergétique pour la croissance verte fixe notamment un objectif de réduction de 50 % des produits manufacturés non recyclables mis sur le marché d'ici 2020. La directive 2009/125/CE (dite « Directive Ecoconception ») vise les produits liés au secteur de l'énergie et a pour objectif la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'efficacité énergétique, et une dimension « cycle de vie » (analyse à tous les stades de la vie d'un produit) pour améliorer la sécurité d'approvisionnement et réduire la dépendance à l'égard des importations.



## La place nouvelle donnée aux territoires aura un impact sur les politiques de développement et l'exploitation des réseaux par RTE

Alors que la politique énergétique est décidée au plan national, voire européen, on constate aujourd'hui une implication croissante des collectivités territoriales sur les problématiques énergétiques. Elles sont des acteurs majeurs de l'innovation sur le territoire et, en tant qu'autorités concédantes, mettent en place des réseaux et des villes intelligentes.

Cette tendance s'est vue récemment institutionnalisée : la loi MAPTAM<sup>10</sup> et la loi sur la transition énergétique ont précisé le rôle des collectivités territoriales en matière énergétique, avec l'apparition de la notion de « collectivité chef de file » à même de fédérer, de mutualiser les politiques et les actions de diverses collectivités et par exemple dans les domaines de l'aménagement et du développement durable du territoire, de la protection de la biodiversité, du climat, de la qualité de l'air et de l'énergie.

C'est notamment le cas pour les Régions qui, par exemple, coordonnent les actions en faveur de l'efficacité énergétique, notamment à travers le schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE), et favorisent l'implantation de plates-formes territoriales pour la rénovation énergétique.

Par ailleurs, le concept de métropole a été revisité par la loi MAPTAM en créant douze métropoles qui constituent un nouvel échelon dans la mise en œuvre des politiques énergétiques, puisque qu'elles sont dotées de responsabilités accrues, notamment sur les sujets de la production d'énergies renouvelables, de la rénovation énergétique des logements, etc.

Enfin, la loi de transition énergétique pour la croissance verte clarifie les possibilités pour les collectivités territoriales de lancer des investissements en matière de transition énergétique. Ainsi, elle introduit principalement deux dispositions nouvelles :

- la possibilité pour les collectivités de participer au capital des sociétés commerciales par actions qui produisent des énergies renouvelables,
- la possibilité pour ces mêmes sociétés d'ouvrir leur capital aux citoyens.

Cette décentralisation de la politique énergétique conduit à réinterroger les relations entre RTE et les collectivités territoriales. Ces dernières, engagées dans une démarche d'optimisation énergétique globale, seront motrices en matière d'intégration multi-énergies (électricité, gaz, chaleur, hydrogène parfois). RTE devra assurément intégrer ces dimensions nouvelles, en premier lieu dans ses politiques de développement et, par la suite, en exploitation.

10 Loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles du 27 janvier 2014.



## L'internet des objets et les nouveaux systèmes de communication ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'exploitation et de la gestion des actifs

De manière générale, on assiste à une profonde transformation de l'ensemble des industries par la numérisation des processus et la connectivité des équipements (c'est le concept « industrie 4.0 »).

- Grâce à l'internet des objets, des équipements jusque-là faiblement suivis/monitorés, pourront l'être davantage. La durée de vie des équipements pourra être mieux maîtrisée, la maintenance plus adaptée et dynamique (anticipation des défaillances par la détection précoce d'endommagements).
- Grâce aux possibilités d'exploitation de gisements massifs de données (« Big Data ») et à de nouveaux systèmes de visualisation, des domaines d'activités, processus et données, jusque-là traités pour la plupart en silo du fait de leur hétérogénéité, vont pouvoir être rapprochés. L'exploitation pourra être ajustée au plus près des limites « réelles » des équipements grâce à un suivi et un pilotage plus fin des équipements, y compris ceux non directement raccordés au réseau public de transport.

Pour le monde de l'énergie, cela ouvre d'importantes perspectives dans le domaine de l'exploitation et de la gestion des actifs.

Un des défis est de disposer de plates-formes adaptées pour saisir les nouvelles opportunités et piloter les nouveaux enjeux associés à l'internet des objets, dans le cadre d'une utilisation raisonnée.

## L'architecture des marchés de l'électricité est remise en cause

L'architecture des marchés de l'électricité créée à la fin des années 1990 se trouve de plus en plus mise en cause.

Sur le plan du fonctionnement du marché court terme, il y a peu à redire et les derniers perfectionnements sont en bonne voie : rapprochement du temps réel par le développement de l'infra-journalier, diminution du pas de temps de programmation, intégration des services système, fluidification du marché européen par l'intégration de la gestion des capacités d'interconnexions dans les marchés, etc.

Mais d'autres faiblesses apparaissent comme structurelles, et notamment la difficulté à utiliser le marché pour rémunérer des investissements capitalistiques importants, et plus encore à en déduire des signaux sur les besoins d'investissement.

Les problèmes de rémunération des moyens de pointe ont longtemps occupé les débats et continuent d'alimenter certains projets de directive européenne : dé plafonner les prix de marché suffirait-il à motiver des investisseurs rémunérés sur des pics de prix peu fréquents, et à éviter la mise en place de mécanismes sécurisant l'approvisionnement dans divers pays européens (mécanisme de capacités, réserves stratégiques, etc.) ?



Mais, aujourd'hui, l'introduction de volumes importants d'EnR crée, d'une part, une situation de surcapacité globale en énergie et, d'autre part, une pression à la baisse des prix de marché vu que leur coût marginal est nul. Il est encore délicat de dire si ce problème est structurel ou conjoncturel, mais l'impact sur les grands groupes énergétiques européens est tel que les GRT, responsables de la sécurité d'approvisionnement, acteurs neutres disposant de l'expertise et de la vision d'ensemble du système, et maîtres d'œuvre des bourses de l'électricité, doivent étudier en détail le fonctionnement prévisionnel des marchés dans les prochaines années et, le cas échéant proposer des mécanismes permettant de mieux rémunérer les acteurs directement via les marchés.

La situation pourrait se détériorer dans le futur pour deux raisons majeures :

— les prix de gros sont trop bas pour stimuler les investissements nécessaires pour remplacer les centrales vieillissantes et pour permettre la décarbonation du secteur. De plus, le coût du capital est d'autant plus important que le secteur de l'électricité est désormais considéré comme risqué, entraînant à long terme des prix plus élevés pour les consommateurs et une baisse de compétitivité des industries européennes.

— Avec de plus en plus d'énergies renouvelables subventionnées hors marché, les prix de détail vont continuer à augmenter tandis que les prix de gros vont baisser. L'électricité de semi-base de moins en moins rentable va causer la fermeture temporaire ou le déclassement de plus en plus fréquent de centrales électriques. Mais ces décisions n'auront pas pour autant pour effet de faire remonter les prix de marché.

L'annonce d'Engie, à fin février 2016, de 4,6 milliards d'euros de pertes nettes, deux ans à peine après avoir déjà perdu 9,7 milliards ainsi que la décision de l'État, courant mars 2016, de recapitaliser EDF, endetté de 37,4 milliards, témoignent de la persistance de ces difficultés.

Ce problème de valorisation tronquée des actifs du système électrique par rapport aux services rendus ne touche pas que les moyens de production : la valorisation des projets d'interconnexion par exemple est plus basse dans les dernières estimations que par le passé, compte tenu de l'anticipation de prix de marché tirés vers le bas par les énergies renouvelables, financées hors marché. Cela vaut aussi pour les autres leviers utiles au système électrique : la gestion dynamique de la demande et le stockage.

Ces problèmes apparaissent aujourd'hui durables et structurels. Ils appellent un travail de fond de révision des modèles de marché (prise en compte de la rémunération de capacités d'une façon ou d'une autre) et d'économie du système électrique, afin de continuer à assurer la sécurité d'alimentation dans le contexte d'un mix largement constitué d'énergies renouvelables.

## Les premières solutions de stockage distribué pourraient commencer à se diffuser

Les technologies avancées de stockage, notamment le stockage électrochimique (les batteries), sont techniquement capables de répondre à certains des besoins soulevés par la transition énergétique :

- développement de la flexibilité nécessaire à l'équilibre offre-demande journalier global, afin de pouvoir stocker l'énergie produite par le vent et le soleil, et la déstocker au moment où elle est consommée ;
- développement de la flexibilité locale, pour éviter les congestions intermittentes induites par la variabilité grandissante des flux, et ce d'autant plus que les solutions classiques de type renforcement de lignes sont rendues plus complexes par le contexte d'incertitude grandissante quant à l'évolution et à la répartition des injections et des soutirages sur le réseau ;
- évolution des services système (par exemple, réglage primaire de fréquence plus rapide avec la diminution de l'inertie) ;
- création de nouveaux services système (par exemple, synthèse électronique du signal de fréquence nécessaire pour synchronisation des réseaux intégrant une large proportion d'EnR).

On notera que le stockage par batteries peut répondre à des services de flexibilité locale (ce qui n'est pas le cas des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) ou des technologies de stockage d'énergie par air comprimé (CAES)), car leur lieu d'implantation est peu contraint par la géographie ou la géologie. En outre, les coûts du stockage électrochimique baissent rapidement, notamment dans la technologie lithium-ion (-15 % par an) qui bénéficie du développement de la filière des véhicules électriques.

Jusqu'à récemment, mis à part les STEP, les autres solutions présentaient des coûts trop importants, des faibles durées de vie, une sensibilité importante aux paramètres extérieurs (température par exemple) et des rendements modérés. Ce constat pourrait devenir caduc dans quelques années. Certains gestionnaires de réseau de transport ont d'ores et déjà recours à ces technologies (exemple : PJM<sup>11</sup>, NG).

Un important effort de recherche et développement est en effet actuellement en cours afin d'améliorer les caractéristiques des systèmes de stockage, notamment des batteries.

- Présentant une capacité quatre fois plus importante que les batteries au plomb pour le même poids et une moindre sensibilité aux paramètres extérieurs, les batteries de type lithium-ion connaissent un déploiement massif. Elles sont vues comme la solution « court terme » à horizon 2020 la plus robuste pour stocker l'électricité.

11 PJM : Pennsylvania –New Jersey – Maryland independent system operator (ISO) de la cote Est des USA.



– Pour l'instant, leur prix est encore élevé. Cependant, les perspectives de fabrication à grande échelle et la nécessité de les utiliser pour démocratiser le véhicule électrique permettent d'envisager une réduction drastique de leurs coûts dans les années à venir.

- Des dizaines d'acteurs innovants existent sur des technologies de batterie en développement ou en déploiement (ex : Aleva, Enphase Energy, BMZ, Tesla, ...).

Ainsi, à mesure que l'amélioration de la pertinence technico-économique du stockage se vérifiera, RTE doit se préparer à l'intégration progressive du stockage dans le système électrique, tant pour des besoins qui relèvent du domaine régulé (congestions intermittentes dépendant de la topologie du réseau, réglages de tension, ...) que pour des besoins qui relèvent du domaine concurrentiel (arbitrage sur les marchés, équilibre offre-demande global). Sa diffusion à grande échelle pourrait bouleverser l'organisation et le modèle économique du secteur électrique. Le développement du stockage dépendant très fortement de l'empilement des valeurs de différents services, la question essentielle est celle de la priorisation de ces services et du partage de la valeur entre les différents acteurs.

Sa diffusion à grande échelle pourrait bouleverser l'organisation et le modèle économique du secteur électrique.

## Intelligence artificielle et apprentissage automatique : des bénéfices potentiels importants pour RTE

Les progrès enregistrés dans le domaine de l'intelligence artificielle (machine learning) depuis 2012 sont considérables (le programme AlphaGo de Deepmind a battu pour la première fois un joueur expert de Go, ce qui était considéré comme tout à fait impossible).

À terme, l'intelligence artificielle pourrait trouver de nombreuses applications dans les métiers de RTE, pour des bénéfices potentiels importants. Ces techniques proposent un nouveau type d'approche pour gérer la croissance évidente de la complexité des systèmes électriques.

L'intégration massive de moyens de production utilisant des installations de production d'énergies renouvelables de plus petite taille, plus décentralisées et interfacées au réseau par de l'électronique de puissance pousse à plus d'intelligence répartie. Le système électrique devient plus que jamais un système de systèmes. Il s'agit de plus en plus de gérer un grand nombre d'agents et d'équipements possédant une certaine autonomie. Cette question va donc bien au-delà de la question désormais classique de la gestion de l'intermittence des énergies renouvelables.

Plus concrètement, ces techniques peuvent être mises en œuvre pour faciliter l'exploitation du système électrique dans ce contexte de complexité croissante. Les approches classiques utilisées par RTE consistent à modéliser le système électrique en utilisant les lois de la physique (électrotechnique) et à utiliser des techniques de simulation et d'optimisation pour fournir des outils d'aide à la décision aux opérateurs.

L'approche fondée sur l'apprentissage automatique consiste d'abord à imiter les décisions des opérateurs (apprentissage par imitation, sans « comprendre »). Il s'agira dans cette première phase, de mettre en œuvre cette approche associée à la simulation, afin de décharger les opérateurs des tâches répétitives et simples pour qu'ils se concentrent sur les situations et les zones problématiques.

La phase suivante, encore plus ambitieuse, serait d'inventer de « nouvelles » décisions en utilisant une technique d'apprentissage par renforcement. La méthode consiste à apprendre en simulant le système électrique pour améliorer les décisions proposées par la phase d'initiale d'imitation (c'est ce type de technique qui est utilisée par AlphaGO ; le programme s'améliore en jouant contre lui-même). Ces approches seront testées dans le cadre du projet APOGEE de développement d'un environnement d'hypervision pour les centres d'exploitation du système de RTE.

RTE utilise déjà ces méthodes pour « simplifier » des modélisations trop complexes avec exemple pour définir des règles « simples » garantissant la sécurité du système (projet iTesla). Il faut généraliser cette démarche et profiter des avancées récentes.

Dans un autre champ, la question de l'optimisation globale du système en prenant en compte tous les horizons temporels (développement, maintenance, exploitation) nécessite nécessairement des « approximations ». L'optimisation de la maintenance requiert une simulation de l'exploitation du système. L'apprentissage automatique peut permettre de trouver la modélisation simplifiée de l'exploitation du système, adaptée à cette optimisation ; de même entre le développement et la maintenance/exploitation. Le projet GARPUR propose de clarifier ces questions.

L'optimisation de la maintenance est une question très importante pour RTE. Il s'agit d'abord d'utiliser des techniques récentes d'analyse de données et d'images (data mining, big data) pour extraire des informations pertinentes. L'intelligence artificielle ou l'apprentissage automatique consistent à proposer ensuite des décisions « optimales » en utilisant ces informations. Le principe est fondé sur la découverte ou l'estimation de l'intensité de liens entre grandeurs (phénomènes). Une question clé est au cœur de cette problématique : ces liens sont-ils des corrélations fortuites ou des relations de cause à effet ? RTE interagira avec les meilleures équipes académiques pour influencer l'avancée de ce sujet et bénéficier des progrès les plus récents.

Ces thématiques se prêtent bien à l'organisation de compétitions ouvertes pour accélérer l'utilisation et la mise au point de ce type de méthode. C'est une autre façon innovante de faire de la recherche.



## II.

# La feuille de route R&D 2017-2020 : continuité et élargissement

En raison du contexte dans lequel ils s'inscrivent, les travaux de R&D de RTE pour la période 2017-2020 sont structurés par trois grandes orientations :

### La valorisation des travaux effectués

Les travaux effectués entre 2013 et 2016 dans le cadre de la première feuille de route seront poursuivis (notamment sur la gestion des actifs, les nouveaux outils pour exploiter le système et l'évolution de l'infrastructure de réseau), pour permettre aux métiers opérationnels de RTE de relever les défis posés aussi bien par le vieillissement du réseau existants que par l'accélération des mutations ;

### Le renforcement d'activités déjà engagées pour évaluer leur impact sur l'organisation des métiers de RTE

Durant la période 2013-2016, les équipes de R&D ont ciblé globalement des activités de recherche spécifiques à chaque métier. Dans le cadre de la feuille de route 2017-2020, les équipes de R&D investigueront des questions plus transverses à l'évolution globale des métiers de RTE :

- la conception de l'architecture de pilotage du réseau,
- la remise à plat de la méthode pour repenser les investissements de demain de manière optimisée entre développement, ingénierie et exploitation,
- la gestion des données massives produites par le monitoring de actifs du réseau (quel niveau d'agrégation, quelle utilisation, quel lien avec l'exploitation),
- l'écoconception à différentes échelles de temps (analyse du cycle de vie des équipements) afin que le réseau de transport fournisse une réponse adaptée aux profondes évolutions que connaissent l'environnement et la société : disponibilité des ressources, coût de l'énergie, réchauffement climatique, remises en question des modèles de consommation, nécessité croissante de favoriser l'économie circulaire.



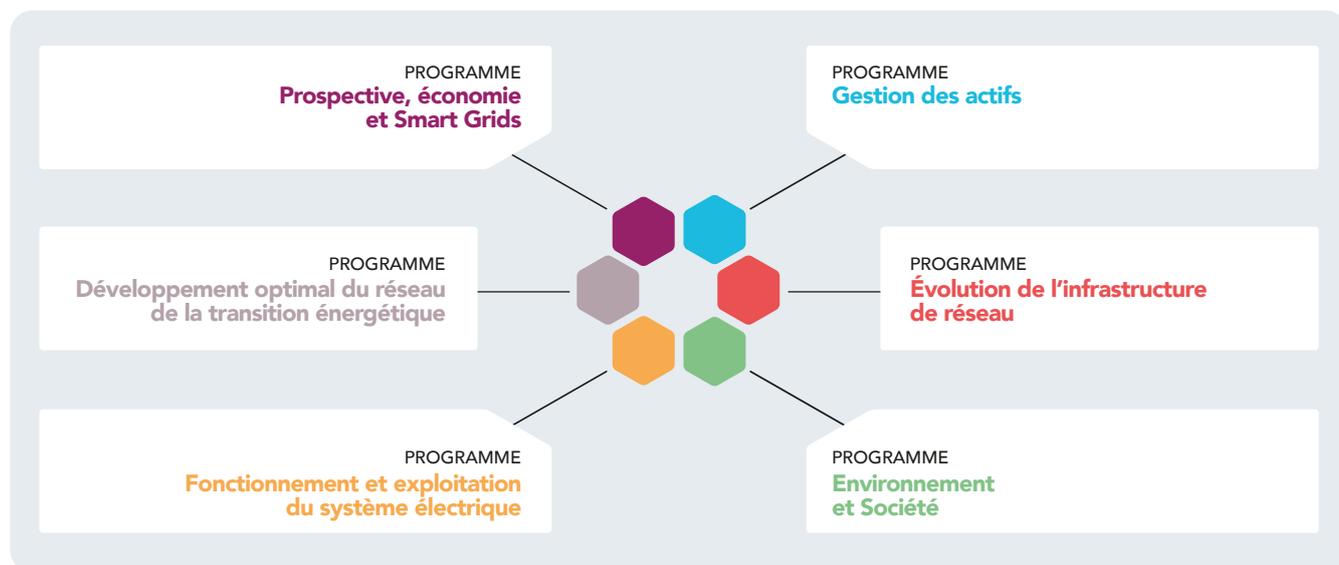
**Le lancement de nouveaux sujets afin de mieux appréhender les missions de RTE dans un environnement plus complexe**

Dans le cadre de leurs travaux sur la période 2017-2020, les équipes de R&D ouvrent de nouveaux chantiers de recherche :

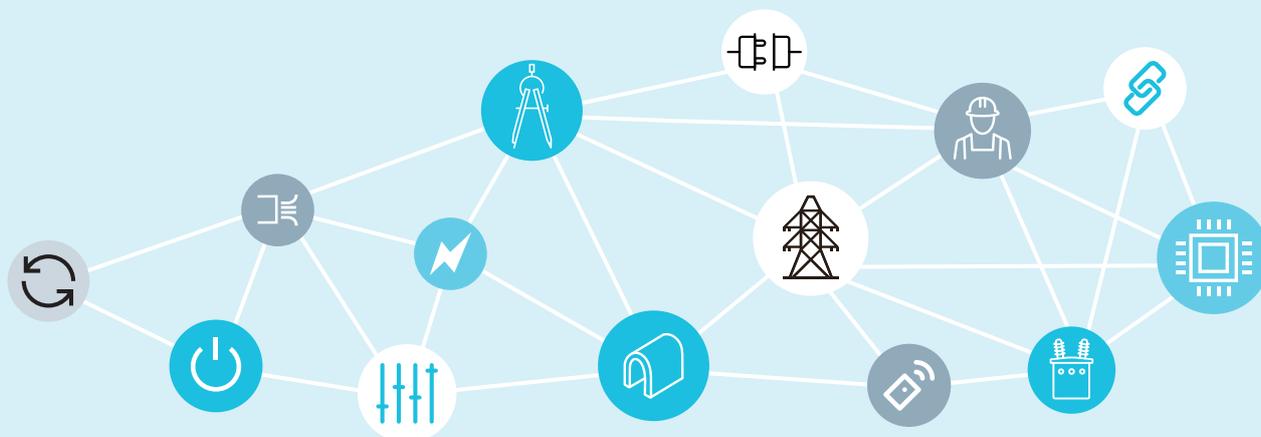
— la montée en puissance des territoires et l'interaction croissante avec les autres acteurs du système énergétique,

— des études de prospective et d'économie pour faire de RTE une force de proposition sur le rôle, l'économie et la régulation du système électrique dans les vingt prochaines années

Dans ce cadre, les travaux de la R&D entre 2017 et 2020 seront structurés au travers de six programmes de travail, regroupant 22 axes de recherche.



# Gestion des actifs



## Les enjeux

À la différence de nombreux gestionnaires de réseaux de transport d'électricité européens, RTE, propriétaire des infrastructures du réseau public de transport, prend directement en charge son développement, sa maintenance et son exploitation. L'ensemble de ces actifs industriels (les ouvrages de transport et les postes électriques d'une tension supérieure à 50 kV) est considérable : 100 000 km de liaisons aériennes, près de 3000 postes, des dizaines de milliers d'équipements, constituant un capital de plus de 13 milliards d'euros.

Cette singularité représente à la fois un défi et un atout.

Un défi car le renouvellement du réseau public de transport, constitué par grandes étapes lors de l'électrification puis l'interconnexion de la France, laisse entrevoir des vagues successives d'investissement difficiles à franchir si l'on ne sait pas intégrer la maintenance dans l'évaluation du vieillissement et l'exploitation dans les stratégies de gestion.

Un atout car la coordination de l'exploitation, de la maintenance et du développement du réseau public de transport dans une gestion intégrée permet de rechercher un optimum global pour la collectivité, en prise avec un contexte de plus en plus volatil. Cet optimum doit prendre en compte, outre l'efficacité économique, la fiabilité et la qualité du transport d'énergie, la sécurité des salariés et des tiers près des ouvrages, la réduction de l'empreinte environnementale.

Le Programme « Gestion des Actifs » a vocation à susciter, détecter et mettre au service de RTE les avancées des sciences et techniques pour :

- Anticiper les vagues de renouvellement des ouvrages qui seront très importantes d'ici 2030 en élaborant des solutions alternatives pour faire face au mur d'investissements associé
- Améliorer la performance et les conditions de travail des métiers de RTE dans la gestion des ouvrages



Plate-forme élévatrice de maintenance des postes.

## Les axes de recherche

-  Observer les ouvrages, les instrumenter et les rendre communicants
-  Construire et valoriser l'imagerie numérique du réseau
-  Expérimenter et modéliser pour prédire le comportement des équipements et du réseau
-  Développer des méthodes et des outils d'aide à la décision pour la gestion des actifs de RTE

## Axe de recherche

### 「 OBSERVER LES OUVRAGES, LES INSTRUMENTER ET LES RENDRE COMMUNICANTS 」



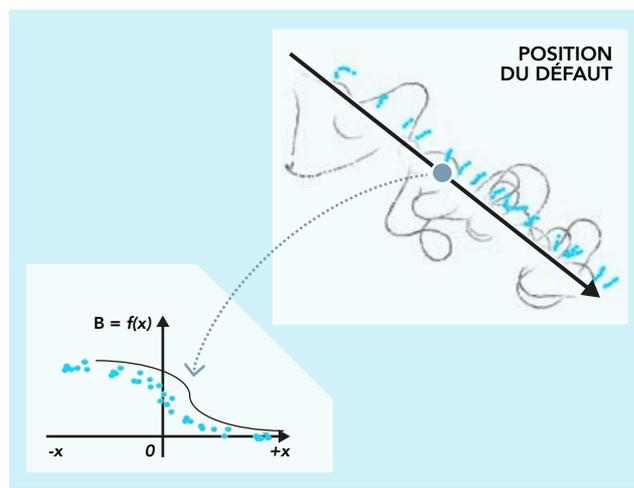
La surveillance et le diagnostic de l'état des ouvrages est une pièce maîtresse de la gestion des actifs.

Cela permet de :

- Estimer plus précisément, à des échéances proches du temps réel, les marges d'exploitation,
- Planifier des opérations de maintenance conditionnelle ou prévisionnelle,
- Préciser la position des ouvrages sur leur courbe de vieillissement, et ainsi ajuster les politiques de renouvellement,
- Ou tout simplement éviter de se déplacer pour surveiller des niveaux de jauges.

Il s'agit de mettre à profit les évolutions rapides des techniques, des méthodes d'envoi et de valorisation des données, pour instrumenter les ouvrages au moyen de systèmes de capteurs innovants, et de mettre à disposition des équipes des outils de diagnostic avancés des équipements.

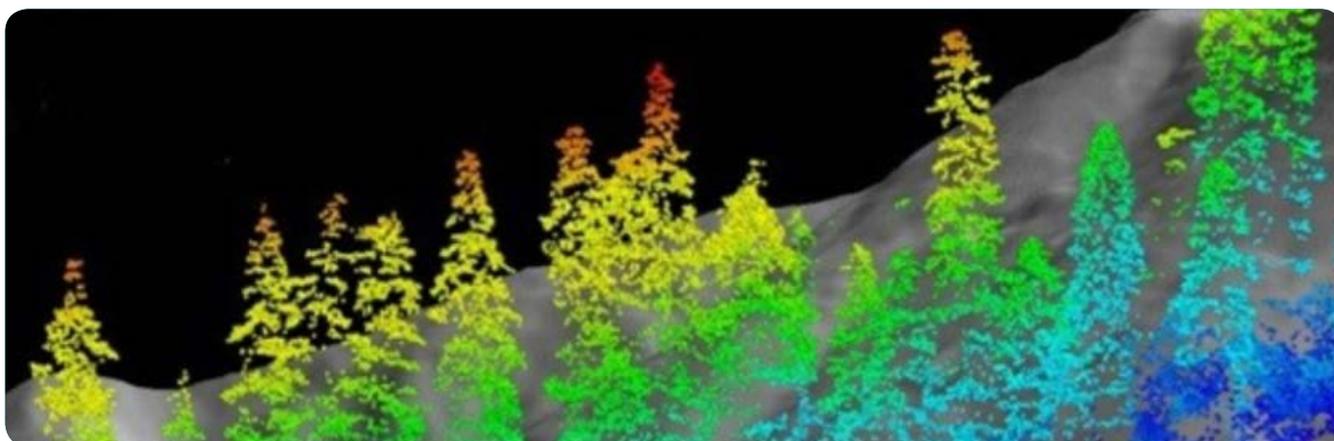
Cet axe de recherche impulse et alimente également la stratégie de RTE en matière de monitoring, d'internet industriel et d'urbanisation des échanges d'informations.



Localisation d'un défaut électrique sur un câble sous-marin.

## Axe de recherche

### 「 CONSTRUIRE ET VALORISER L'IMAGERIE NUMÉRIQUE DU RÉSEAU 」



Le terme d'imagerie numérique évoque l'association d'une grandeur à chaque point d'un objet, avec une certaine résolution. Cela recouvre non seulement les photos, mais aussi les relevés LIDAR<sup>1</sup>, l'imagerie multi-spectrale, etc.

Les expériences menées ces dernières années sur l'acquisition massive de données sur les ouvrages et sur les moyens d'acquisition (drones, imagerie aéroportée) rendent très optimistes sur les perspectives ouvertes par ces technologies.

Dans cet axe, trois grands domaines sont explorés :

- *Le traitement automatique des images, comme la reconnaissance de défauts ou la mesure d'évolution entre des images acquises à des moments différents. Ce traitement sera d'autant plus nécessaire que la masse des informations acquises va grossir.*
- *L'optimisation de l'acquisition des données et la modélisation des données, qui constituent de loin le maillon le plus coûteux de cette chaîne de valeur.*

- *L'introduction à RTE des techniques de réalité virtuelle et de réalité augmentée, susceptibles d'améliorer sensiblement l'efficacité et les conditions de travail des équipes opérationnelles, notamment de maintenance.*



<sup>1</sup> Acronyme de « light detection and ranging » : télédétection par laser, technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur.

## Axe de recherche

### 「 EXPÉRIMENTER ET MODÉLISER POUR PRÉDIRE LE COMPORTEMENT DES ÉQUIPEMENTS ET DU RÉSEAU 」



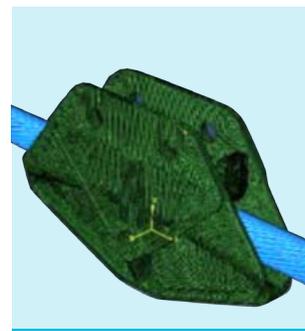
Programmer les politiques de renouvellement des équipements sur la base d'une durée de vie théorique conduit à ce que la construction par grandes étapes du réseau se traduise mécaniquement par des vagues successives d'investissement, potentiellement difficiles à surmonter. La capacité à anticiper ou surtout retarder ces opérations appelle une meilleure connaissance de l'espérance de vie des équipements, compte tenu de leur histoire et de leur environnement individuel (fréquence de manœuvre, humidité, tension d'exploitation, etc.). C'est l'objet de cet axe de recherche.

Approcher cette connaissance repose de façon complémentaire sur un ensemble de techniques expérimentales (essais, vieillissement accéléré, étude d'échantillons prélevés sur le réseau), et numériques (simulation, analyse statistique de corrélation, modèles de survie).

Réciproquement la connaissance des mécanismes de dégradation et des points faibles des équipements permet également d'améliorer leur conception, qu'il s'agisse de spécification, de normalisation ou d'analyse du cycle de vie et d'écoconception.



Analyse de rupture d'un brin conducteur.



Modélisation mathématique d'un conducteur électrique et de son support.

## Axe de recherche

### « DÉVELOPPER DES MÉTHODES ET DES OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION DES ÉQUIPEMENTS DE RTE »

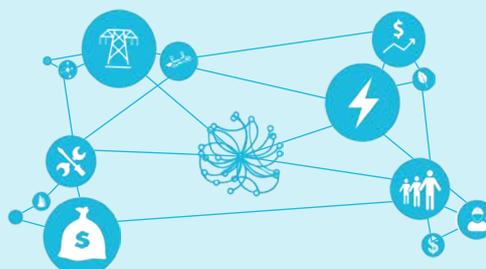


Les outils de « data analytics » proposant une planification opérationnelle de la maintenance arrivent progressivement à une certaine maturité. Mais rien ne vient appuyer la définition des stratégies de gestion d'actifs, répondant à des questions plus générales : faut-il réduire ou au contraire augmenter les moyens consacrés à la maintenance ? La durée des consignations, qui détermine bien des modes opératoires, est-elle vraiment un facteur de risque en exploitation ? Comment arbitrer entre politiques techniques ou entre maintenance et renouvellement ?

Cet axe de recherche est consacré à la fourniture d'outils permettant de comparer les différentes stratégies et de peser l'influence des hypothèses. Alimenter ainsi le dialogue favorise l'émergence de choix partagés entre les différents acteurs impliqués : les métiers opérationnels, les experts, le management, voire le régulateur.

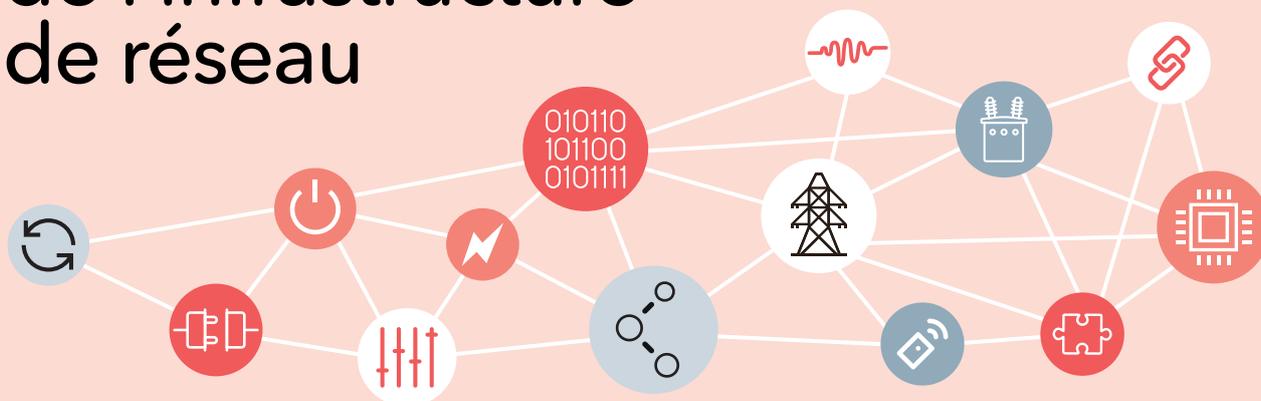
En outre, la R&D s'efforce de partager les choix méthodologiques de RTE en appuyant la diffusion des outils et en participant à l'activité normative.

#### LE PROJET MONA (Management and Optimization of Network Assets)



Fondé sur un partenariat avec la start-up lyonnaise The Cosmo Company, le projet MONA a pour objet de rechercher des stratégies de gestion des actifs robustes et globalement optimales par la simulation de systèmes complexes.

# Évolutions de l'infrastructure de réseau



## Les enjeux

L'infrastructure du réseau d'électricité doit s'adapter afin de répondre au contexte actuel de mutations : transition énergétique, numérique et environnementale. En s'adaptant, il permettra de répondre aux évolutions du système électrique qui en résultent :

- un marché unique de l'électricité efficient ;
- un mix énergétique qui peut être très différent suivant les scénarios économiques les plus probables ;
- une sobriété énergétique avec une consommation de plus en plus flexible.

Dans ce cadre, le Programme « Évolution de l'infrastructure de réseau » a donc vocation, d'une part, à faire évoluer les technologies et les composants de l'infrastructure du réseau d'électricité à haute et très haute tension (HT et THT) et, d'autre part, amener ces technologies à maturité par le moyen de simulation, maquettes, projets européens et systèmes installés en environnement représentatif ou réel dans le cadre de projet RTE ou en consortium. In fine, l'objectif est d'intégrer tout ou partie de ces travaux dans les cahiers des charges techniques des futurs déploiements industriels de RTE.

Le périmètre d'application de ce programme comprend :

- les ouvrages de transport d'énergie : liaisons aériennes, souterraines et sous-marine, et leur parties constitutives (les conducteurs et les isolants, mais aussi leurs supports, leurs accessoires et leurs matériaux) ;

- les postes électriques : postes aériens, sous-enveloppes et sous-marins, du point de vue de leurs structures et de leurs constituants élémentaires (disjoncteurs, sectionneurs, transformateurs, barres, ... ainsi que son contrôle-commande et monitoring intégrés) ;

- les techniques de réseaux à courant continu : en point à point, en multi-terminaux interagissant ensemble, en réseau maillé (modélisation, fonctionnement) ;

- les protections, le contrôle-commande et plus généralement les principes de défense du réseau.

Augmenter l'efficacité énergétique (par exemple réduire les pertes par effet Joules ou l'effet couronne) dans tous les nouveaux composants, augmenter la flexibilité des transits dans les ouvrages, augmenter la production d'informations numériques par les équipements et leur diffusion aux différents centres de traitement (pour la conduite et pour la maintenance), diminuer l'empreinte environnementale (surface réduite, moins d'équivalent CO<sub>2</sub> émis, moins de matériaux stratégiques), maîtriser et se préparer à gérer les nouveaux risques associés à ce nouveau contexte seront les critères moteurs du programme de recherche.

Une caractéristique de ce programme est de nécessiter une implication régulière des experts de RTE dans les organismes de normalisation IEC et CENELEC pour donner une assise plus forte et pérenne aux travaux menés.

## Les axes de recherche

-  Améliorer l'efficacité énergétique des liaisons
-  Préparer les nouvelles générations de postes électriques
-  Préparer l'arrivée des réseaux maillés en courant continu
-  Adapter le contrôle-commande, les protections et les principes de défense aux nouveaux enjeux et risques associés

## Axe de recherche

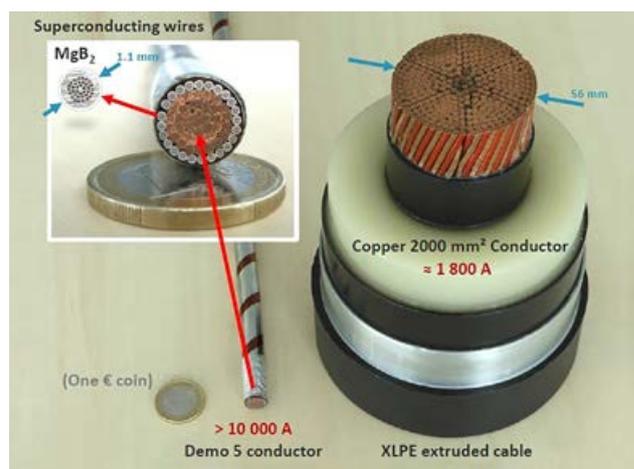
### AMÉLIORER L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES LIAISONS



Les liaisons de RTE représentent plus de 100 000 kilomètres et se répartissent entre liaisons aériennes, souterraines et sous-marines. Aujourd'hui, dans un contexte où l'insertion de nouveaux ouvrages de transport d'électricité reste une problématique majeure, l'objectif est de développer des technologies permettant d'augmenter la capacité de transit des ouvrages existants et de leur donner plus de flexibilité en termes de conditions de fonctionnement :

- l'étude de nouveaux matériaux pouvant, par exemple, répondre aux besoins d'augmentation de transit sans pour autant augmenter les contraintes mécaniques sur les infrastructures (nanotubes de carbones) ou étant capables de limiter fortement les pertes pour des puissances transitées élevées (supraconducteur) ;
- l'étude de l'évaluation en temps réel de la capacité de transit réelle de l'ouvrage en exploitant les données météorologiques locales et la connaissance de l'état physique de l'ouvrage (dynamic line rating) ;
- l'étude de nouveaux leviers de flexibilité comme, par exemple, un dispositif de modification de l'impédance d'une liaison aérienne pour permettre la répartition du flux électrique sur les ouvrages les moins chargés.

Enfin, un pan de cet axe de recherche est consacré à l'étude des nouvelles technologies de câbles aériens et souterrains (notamment les évolutions des liaisons à isolation gazeuse sans SF<sub>6</sub>) sous un prisme global : prévision de leur comportement, analyse de leur cycle de vie et impact environnemental faisant partie de la méthodologie de l'écoconception.

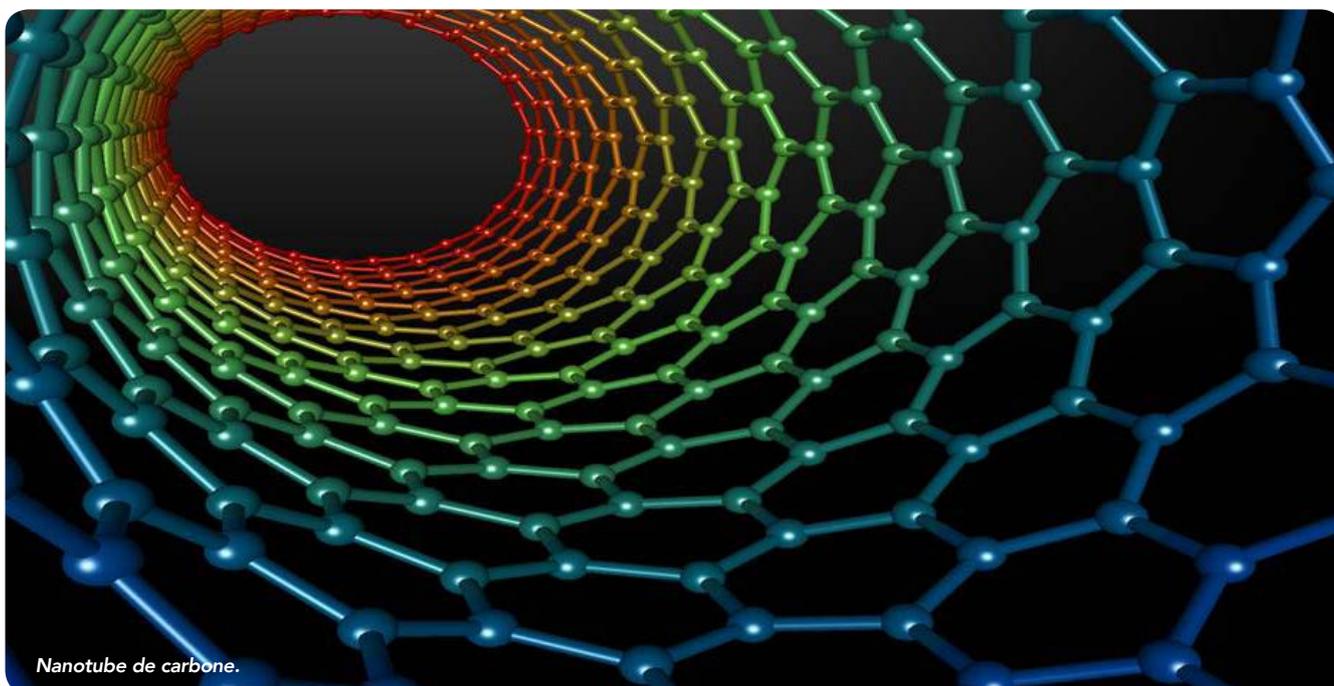


Projet Best Paths : mise au point d'un câble supraconducteur à courant continu.





Pose de câble lors du chantier « filet de sécurité PACA ».



Nanotube de carbone.

## Axe de recherche

### 「 PRÉPARER LES NOUVELLES GÉNÉRATIONS DE POSTE ÉLECTRIQUE 」



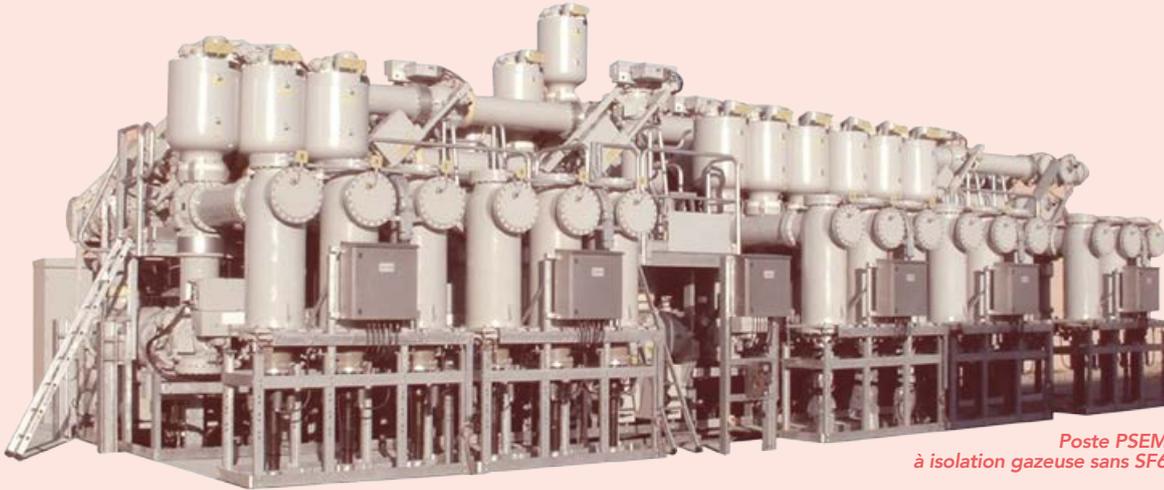
Le réseau de RTE est constitué de près de 3 000 postes électriques, qui constituent des nœuds stratégiques pour la gestion des flux d'énergie mais aussi des flux de données. Préparer les nouvelles générations de poste électrique consiste à déterminer leurs composants et leur architecture pour améliorer la disponibilité des structures de poste, leur efficacité énergétique et leur écoconception tout en accroissant le volume de données qu'ils émettent et qui informent sur leurs états de fonctionnement interne.

Cet axe de recherche se consacre à l'étude de nouveaux composants ou méthodes permettant d'augmenter la durée de vie et la disponibilité de la structure de poste : par exemple, expérimentation d'aciers autopatinables résistant à la corrosion atmosphérique, évaluation de méthode de détection de décharges partielles pour prévenir la détérioration des isolants présents dans le poste ou encore utilisation de limiteurs de courant pour diminuer l'impact sur le matériel du fort appel de courant généré lors d'un court-circuit.

Les potentialités offertes par les nouvelles technologies de composants de postes et répondant aux enjeux environnementaux et de transition énergétique seront également explorées. On étudie notamment des solutions alternatives à l'utilisation du gaz SF<sub>6</sub> (puissant gaz à effet de serre) par le biais d'un démonstrateur de poste sous enveloppe métallique utilisant un gaz diélectrique sans effet de serre (voir [LE PROJET PSEM](#)).

Des études approfondies sont menées sur la faisabilité de déploiement d'un poste sous-marin HTB pour raccorder les nouvelles énergies marines : les hydroliennes et les éoliennes flottantes.

La problématique d'évacuation de l'énergie éolienne du Nord de la France est traitée sous la forme d'un démonstrateur de poste nouvelle génération en poste aérien présentant un usage massif de la numérisation (interface tout numérique) ainsi qu'une nouvelle architecture de contrôle-commande et proposant des fonctionnalités avancées d'automatismes (voir [LE PROJET POSTE INTELLIGENT](#)).



Poste PSEM  
à isolation gazeuse sans SF6

## LE PROJET PSEM (POSTE SOUS ENVELOPPE MÉTALLIQUE) DE GRIMAUD 63 KV SANS GAZ SF6

Un poste sous enveloppe métallique est un poste électrique compact utilisant un gaz sous pression présentant des caractéristiques d'isolement supérieures à celles de l'air.

L'objectif est d'expérimenter une nouvelle génération de poste sous enveloppe métallique (PSEM) avec un mélange de gaz ayant un impact en équivalent CO<sub>2</sub> environ 90 % plus faible que le traditionnel gaz SF<sub>6</sub>.

## LE PROJET POSTE INTELLIGENT

L'objectif est d'expérimenter une nouvelle génération d'équipements de contrôle-commande et de moyens de mesure et de surveillance (monitoring) numérisant les grandeurs physiques au près des appareils de puissance. Dans cet environnement « tout numérique », la mise en œuvre de nouvelles fonctions complexes d'automatisme de zone devient possible.



## Axe de recherche

### 「 PRÉPARER L'ARRIVÉE DES RÉSEAUX MAILLÉS EN COURANT CONTINU 」



D'ici 2024, entre 800 et 1 000 kilomètres de nouvelles liaisons à courant continu souterraines ou sous-marines seront construites par RTE. Cet axe de recherche a pour objectif de valider le potentiel des diverses technologies qui vont permettre, d'une part, l'intégration des liaisons à courant continu dans les réseaux à courant alternatif, et d'autre part, d'organiser l'avènement de réseaux maillés exploités en courant continu, dénommé « SuperGrid » dans les projets européens.

Les avantages du transport de l'électricité en courant continu à haute ou très haute tension (en point à point) dans des câbles de longue distance sont l'efficacité énergétique (moins de pertes pour les puissances importantes), ainsi qu'un contrôle plus fin du mode de fonctionnement de l'installation HVDC, notamment pour la gestion des situations transitoires ou d'urgence, et donc une meilleure maîtrise de la propagation de ces événements entre les réseaux.

Le challenge d'un réseau maillé en courant continu est la maîtrise et la protection des personnes et des biens, car les algorithmes et équipements traditionnels de détection et d'élimination d'un défaut ne s'appliquent plus (pas de passage par zéro et accroissement très rapide du courant de court-circuit à couper) et la coordination des systèmes de contrôle-commande des stations HVDC pour en limiter la propagation.

Les travaux de cet axe de recherche prennent principalement corps dans des participations à deux projets européens (BEST

PATHS et PROMOTION). RTE y pilote notamment un démonstrateur sur l'interopérabilité des contrôles-commandes des stations de conversion multifournisseurs et une étude sur l'interopérabilité des systèmes de protection sur un même réseau de courant continu, ainsi que les modes de commande de ces liaisons.

L'étude des limiteurs de courant est menée conjointement avec l'axe « Améliorer l'efficacité énergétique des liaisons ». Ces limiteurs pourraient s'avérer fort utiles dans un réseau continu intégré dans un réseau alternatif. L'élévation du courant est importante et très rapide lors d'un court-circuit ce qui peut endommager la station de conversion. Afin de laisser du temps au système de protection pour réagir, l'utilisation de limiteurs de courant qui maintiendraient à chaque instant et automatiquement (sans capteur ni calcul) les flux de puissance en dessous des capacités des ouvrages permettrait d'assurer la sûreté de fonctionnement du réseau hybride courant alternatif/courant continu.

RTE approfondit également sa connaissance du comportement des stations HVDC en jouant des scénarios réels ou probables dans son laboratoire numérique comprenant un simulateur temps réel et des répliques du contrôle-commande de la liaison France-Espagne. Des collaborations avec des partenaires académiques permettent l'évaluation de topologies complexes de réseau continu (réseau à dix terminaux) en interaction avec un réseau alternatif.



*Vue intérieure du tunnel sous les Pyrénées (interconnexion France-Espagne).*

## Axe de recherche

### ADAPTER LE CONTRÔLE-COMMANDE, LES PROTECTIONS ET LES PRINCIPES DE DÉFENSE DU RÉSEAU AUX NOUVEAUX ENJEUX ET RISQUES ASSOCIÉS



Adapter **LE CONTRÔLE-COMMANDE**, **LES PROTECTIONS** et **LES PRINCIPES DE DÉFENSE** du réseau aux nouveaux enjeux et risques associés consiste à prendre en compte les nouveaux besoins fonctionnels (exploitation, maintenance, ingénierie) compte tenu des possibilités technologiques et de la nature en pleine évolution des éléments connectés au réseau, tant en ce qui concerne la production que la consommation, et à étudier les stratégies de défense pour maîtriser les nouveaux risques.

Les actions mises en œuvre dans le cadre de cet axe de recherche ont pour objectif de développer une architecture numérique capable d'acquérir et de diffuser en toute sécurité toutes les mesures et données nécessaires à la protection et à l'exploitation du réseau, d'évaluer des algorithmes de protection performants (détection rapide, ciblée voire préventive des défauts), tout en garantissant une résilience du système aux aléas et attaques par un plan de défense adapté.

L'axe de recherche se consacre notamment à :

— évaluer les possibilités d'architectures plus virtualisées offertes par les progrès du numérique, comme la virtualisation de plusieurs protections au sein d'un même calculateur centralisé ;

— évaluer la précision, l'inviolabilité et la traçabilité de la chaîne de mesure des comptages d'énergie dans un environnement où les données et les traitements associés sont numériques ;

— évaluer des nouveaux algorithmes de protection performants s'appuyant sur la richesse des informations disponibles dans les postes numérisés (courant, tension en plusieurs points, conditions atmosphériques, etc.) et sur les performances des nouveaux calculateurs désormais capables de faire tourner des modélisations en temps réel d'une zone électrotechnique (poste, lignes, etc.) ;

— étudier la résilience du plan de défense dans un contexte en pleine mutation où l'électronique de puissance est de plus en plus présente, où le bon fonctionnement du système électrique est dépendant de la disponibilité du système de télécommunication et de la structure informatique, où la cyberattaque est une réalité à prévoir (brouillage massif, perte des services informatiques ou télécoms) et où les aléas météorologiques pourraient avoir leur influence (orage magnétique, ...).

## LE CONTRÔLE-COMMANDE

Le contrôle-commande désigne l'ensemble des équipements d'informatique industrielle et de télécommunication nécessaire pour assurer les fonctions d'observabilité, de protégeabilité et de télécommandabilité du réseau électrique. Il comprend notamment les protections, les automatismes, le comptage, etc.



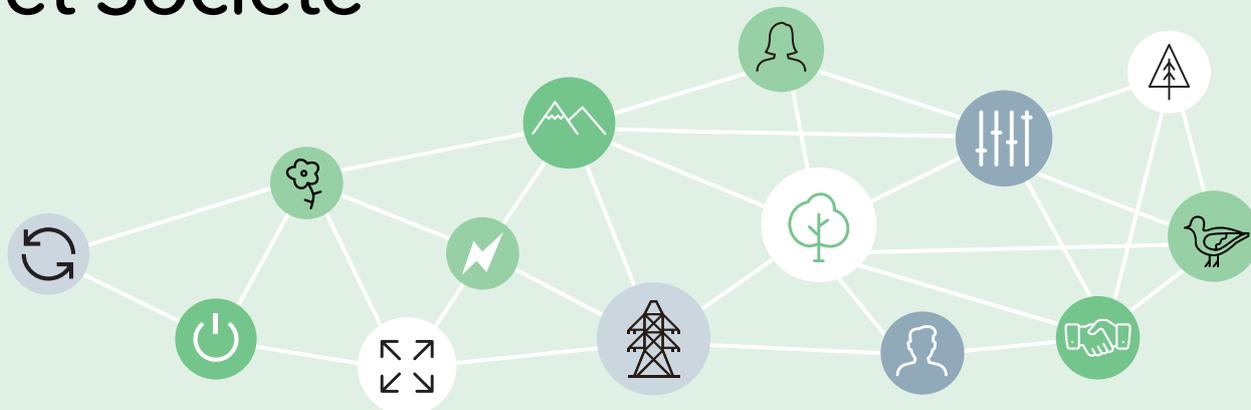
## LES PROTECTIONS

La fonction d'une protection est de protéger les personnes et les biens contre les effets destructeur d'un courant de court-circuit. En cas de détection d'un défaut, elle envoie des ordres d'ouverture aux différents disjoncteurs concernés. L'ensemble des règles d'agencement des protections constitue des plans de protection.

## LE PLAN DE DÉFENSE

Le plan de défense contient l'ensemble des règles d'agencement des protections spécifiques pour gérer un incident de grande ampleur.

# Environnement et Société



## Les enjeux

L'environnement et la société connaissent de profondes évolutions, dont les processus s'accélèrent : disponibilité des ressources, coût de l'énergie, réchauffement climatique, pollutions, érosion du patrimoine naturel, remises en question des modèles de consommation, nécessité croissante de favoriser l'économie circulaire, locale, etc.

Ces évolutions sont accompagnées de modifications législatives et réglementaires et constituent autant de facteurs nécessitant une attention particulière de RTE dans ses choix technologiques et ses gestes techniques.

Par les actions de recherche qu'il porte et par sa veille active sur ces phénomènes, le programme de R&D « Environnement et Société » a pour objet d'éclairer ces choix, afin de garantir leur « durabilité » (c'est-à-dire leur caractère « soutenable », économiquement et environnementalement, au sens large et dans la durée).



## Les axes de recherche

-  Lutter contre le changement climatique, gérer durablement les ressources et prévenir les pollutions
-  Capter les facteurs sociétaux interférant avec le choix de nos solutions
-  Participer à la protection de la biodiversité et des services rendus par les écosystèmes au niveau des ouvrages

## Axe de recherche

### 「 LUTTER CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, GÉRER DURABLEMENT LES RESSOURCES ET PRÉVENIR LES POLLUTIONS 」



La lutte contre le réchauffement climatique, la raréfaction annoncée de ressources minérales (en particulier le cuivre), le coût énergétique croissant de la production et du transport des matériels, le contexte réglementaire s'accroissant avec les pollutions, sont autant d'enjeux à investiguer et prévenir pour les années à venir. Ils s'inscrivent dans un contexte sociétal auquel RTE prend sa part, en tant qu'entreprise responsable et en tant qu'acteur clé de la transition énergétique. Facteur d'adaptation de l'entreprise et du réseau vis-à-vis de ces enjeux, facteur moteur également pour la croissance verte, la démarche écoconception animée par le programme de R&D « Environnement & Société », accompagne cette évolution pour faire, de cette approche, le socle méthodologique pour élaborer les solutions de RTE.



Câble avec âme en cuivre.



## Axe de recherche

### 「 CAPTER LES FACTEURS SOCIÉTAUX INTERFÉRANT AVEC LE CHOIX DE NOS SOLUTIONS 』



Face à des oppositions sociétales vigoureuses et des questionnements de la part des populations sur les infrastructures et sur les technologies nouvelles, face également à des velléités d'autonomisation et de production locale, l'insertion des ouvrages de transport d'électricité (les ouvrages « terrestres » et les infrastructures offshores) reste un sujet majeur.

Dans ce contexte, il est important que RTE développe davantage une approche multidisciplinaire en sciences sociales, pour comprendre et s'adapter rapidement aux évolutions sociétales, elles-mêmes en changement rapide, à la fois pour aider à repenser ses propres représentations dans le contexte des transitions numérique, énergétique et environnementale en cours et pour mieux dialoguer avec les territoires.





## LE PROJET LIFE

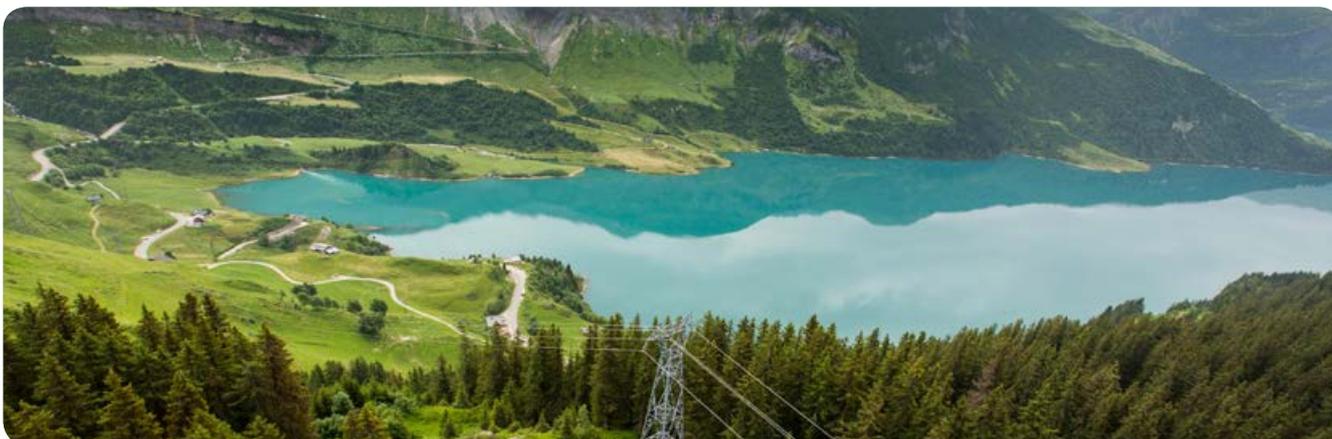
Engagé pour la prise en compte de la biodiversité présente dans l'emprise de ses lignes, RTE s'est associé avec son homologue belge ELIA dans le cadre d'un programme européen LIFE pour mener une gestion alternative dans ces espaces. Au bout de 6 ans, l'expérience réalisée sous 100 kilomètres de lignes en Wallonie et sur sept sites en France, témoigne d'un retour absolument positif sur le plan environnemental, économique (retour sur investissement obtenu au bout de quelques années par rapport à un gyrobroyage classique répété tous les trois à quatre ans) et sociétal (liens avec le territoire, partenariats avec les acteurs de l'environnement et du monde agricole, notamment).

Fort de cette première expérience, RTE renouvelle l'expérience à une échelle plus large (« régionale »), avec ses partenaires, pour dimensionner, à la maille nationale, sa mise en œuvre sur les secteurs présentant des enjeux environnementaux significatifs.



## Axe de recherche

### 「 PARTICIPER À LA PROTECTION DE LA BIODIVERSITÉ ET DES SERVICES RENDUS PAR LES ÉCOSYSTÈMES 」

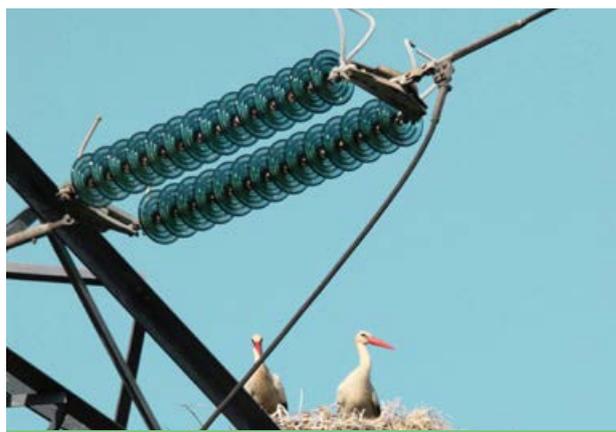


De plus en plus artificialisés, fragmentés, atteints par des évolutions liées au climat, aux espèces invasives, à l'uniformisation des pratiques de gestion, les milieux naturels voient progressivement s'éroder la biodiversité qui les constituait. Responsable de la gestion de la végétation sous les 100 000 kilomètres de lignes de son réseau, lignes croisant de nombreux milieux (forêts, landes, tourbières, marais, prairies, etc.), RTE, au titre de sa responsabilité environnementale, est conscient de l'importance que revêt une gestion adaptée des écosystèmes en place.

Mobilisé pour cet enjeu, le programme de R&D « Environnement et Société » porte des actions destinées à mieux connaître la biodiversité et les fonctions écosystémiques (« corridors » notamment) présentes dans les emprises situées sous les lignes, ainsi que les moyens d'en assurer la gestion pour permettre à ces espaces d'assurer pleinement leur fonction écologique.

Ces actions mobilisent à la fois des chercheurs et des gestionnaires de milieux naturels, implantés dans les territoires. À travers elles, et à travers ces partenariats, ce sont ainsi autant de fonctions, de services, rendus par les écosystèmes, qui seront progressivement restaurés.

RTE raccordera, dans les années qui viennent, plusieurs parcs de production éolienne offshore. Méconnu aujourd'hui, le comportement de la faune et de la flore marines aux abords de ces ouvrages (lors des travaux, puis en exploitation), nécessite d'être étudié. Il mobilise, à ce titre, des actions partenariales de recherche avec des laboratoires spécialisés dans le domaine marin.





# Fonctionnement et exploitation du système électrique



## Les enjeux

Les missions fondamentales de RTE sont d'assurer la qualité d'alimentation, la sûreté et les performances économique et environnementale du système électrique, système qui a été reconnu par l'Académie nationale des sciences américaine comme la machine humaine la plus complexe jamais réalisée<sup>1</sup>.

Dans un contexte où les injections et les soutirages d'électricité sont de plus en plus variables et incertains, le système électrique, son fonctionnement et son exploitation sont en pleine transformation.

Cette transformation est un défi à la fois :

- d'un point de vue technologique : l'introduction massive de l'électronique de puissance pose des problèmes d'inertie, des problèmes de transitoires électromagnétiques, des problèmes de choix des protections à utiliser sur le réseau et des réactions des équipements aux courants de court-circuit ;
- et d'un point de vue organisationnel avec, d'un côté, l'émergence d'acteurs plus décentralisés (par exemple avec une implication croissante des métropoles et des territoires sur les questions d'énergie) et, de l'autre côté, la poursuite de l'intégration européenne (par exemple, coordination de l'exploitation des différents réseaux d'électricité).

Pour ces raisons, les fondamentaux du fonctionnement et de l'exploitation du système électrique doivent être revisités. Le programme « Fonctionnement et exploitation du système électrique » se reposera la question de l'architecture globale de pilotage du système en intégrant les dimensions techniques (par exemple, quelle dépendance aux infrastructures de télécommunications), étudiera l'adaptation du système en tirant partie des nouvelles opportunités technologiques (par exemple, internet des objets pour une meilleure connaissance des limites d'exploitation ou encore la mobilisation de nouveaux leviers d'actions distribués et l'utilisation de solutions de stockage aujourd'hui matures) et cherchera à optimiser l'exploitation du système au moindre coût pour la collectivité tout en assurant la sûreté de fonctionnement.

Des travaux de prénormalisation (IEEE et CIGRE) et de normalisation seront suivis plus précisément afin de publier la vision des gestionnaires de réseau de transport, notamment sur le rôle des nouveaux acteurs, sur les modèles possibles d'agrégation et sur les différents cas d'usage possibles dans le domaine de l'exploitation du réseau.

<sup>1</sup> Scores of times each day, with the merest flick of a finger, each one of us taps into vast sources of energy—deep veins of coal and great reservoirs of oil, sweeping winds and rushing waters, the hidden power of the atom and the radiance of the Sun itself—all transformed into electricity, the workhorse of the modern world." Source : <http://www.greatachievements.org/?id=2949>

## Les axes de recherche

-  Concevoir l'architecture de pilotage du réseau électrique du futur
-  Intégrer dans le système électrique les nouveaux leviers de flexibilité
-  Optimiser l'exploitation du système
-  Maîtriser la stabilité du système dans un réseau en mutation

## Axe de recherche

### 「 **CONCEVOIR L'ARCHITECTURE DE PILOTAGE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE DU FUTUR** 」



Production et effacements diffus, autoconsommation, stockage local d'un côté, partage de réserves et coordination des parades européennes de l'autre. Plus d'intelligence dans les postes et plus d'intelligence dans les futurs systèmes de conduite en dispatching. Tout ceci se développe dans un environnement où les moyens de télécommunications offrent des opportunités nouvelles, les facteurs limitants étant davantage la cybersécurité et le besoin de résilience des solutions mises en œuvre pour exploiter le système électrique dans sa globalité.

Dans ce nouveau terrain de jeu, quelles mailles pour quelles composantes de l'équilibre offre-demande ? Quelle répartition dans l'utilisation des intelligences locales et centralisées ? Quelle maille d'action et quel niveau de pilotage associé pour les automates en fonction de leur utilité et de leur besoin de résilience ? Quelle architecture de télécommunications en support et quelle interopérabilité avec les distributeurs et les autres GRT ?

Autant de questions que le présent axe de recherche devra instruire, pour être à même de proposer une architecture de pilotage du réseau d'électricité du futur.



## Axe de recherche

### 「 INTÉGRER DANS LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE LES NOUVEAUX LEVIERS DE FLEXIBILITÉ 」



Le réseau d'aujourd'hui a déjà recours à des leviers de flexibilité : actions topologiques, transformateurs déphaseurs, automates de débouclage, actions sur la production ou la consommation. Demain, c'est une part croissante de la dispersion des flexibilités diffuses qu'il faudra intégrer (effacements de consommation et productions photovoltaïques résidentielles, etc.), ainsi que de nouvelles flexibilités rendues possibles par des progrès technologiques matures : stockage résidentiel ou de plus forte puissance implanté à des endroits stratégiques du réseau de transport, généralisation des liaisons haute tension à courant continu (HVDC), capacité variable de transit sur les ouvrages (dynamic line rating - DLR), etc.

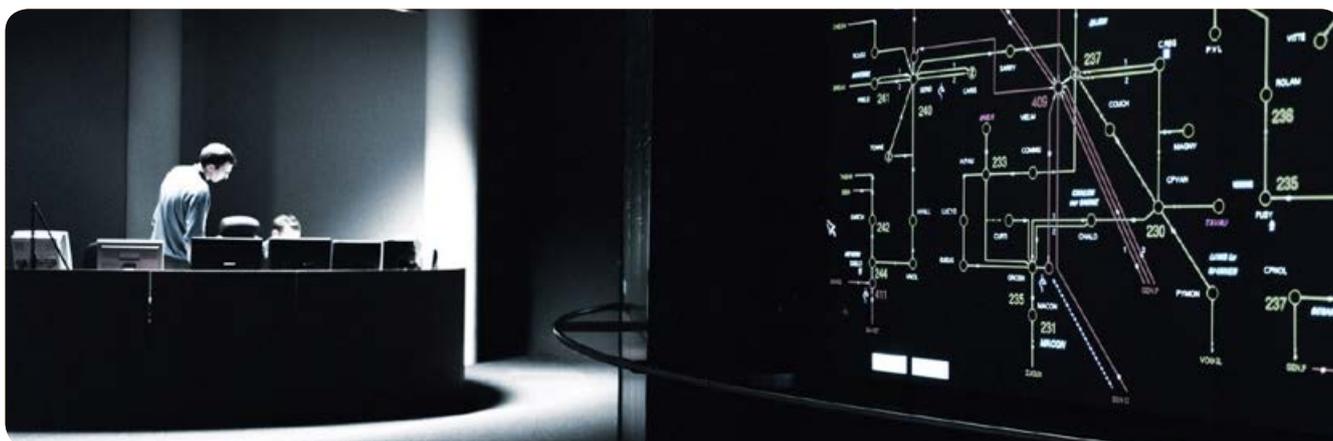
Dans ce nouveau terrain de jeu, il conviendra d'étudier les modalités d'intégration de ces leviers dans nos processus de pilotage du système électrique et donc dans les outils d'optimisation de la sûreté du système. Les questions de modularité, de systèmes communicants, de spécification auprès des partenaires et/ou fournisseurs, en vue de garantir l'intégration initiale cohérente de chaque levier, ainsi que l'évolutivité nécessaire des utilisations dans un contexte fortement mouvant, seront au cœur des réflexions.



*Capteur utilisé dans le cadre du dynamic line rating.*

## Axe de recherche

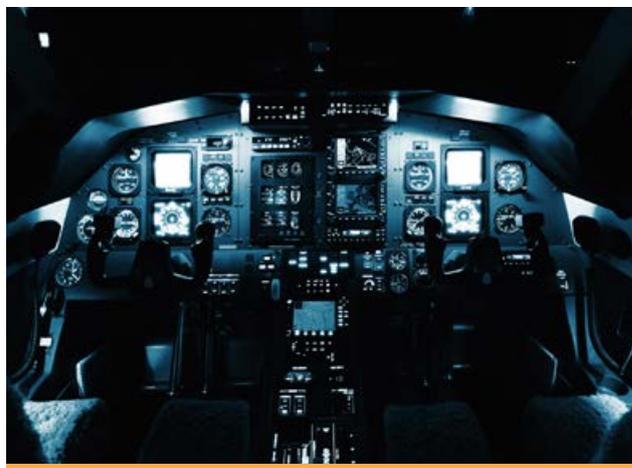
### 「 OPTIMISER L'EXPLOITATION DU SYSTÈME 」



D'un côté, l'exploitation du système électrique s'opère de plus en plus près des limites (limites physiques qui, de plus, varient en temps réel) et dans un contexte où les injections/soutirages sont de plus en plus variables (variabilité de la source d'énergie primaire comme la force du vent ou le rayonnement solaire) et incertains. D'un autre côté, les leviers d'actions se multiplient : DLR, liaisons HVDC, lignes virtuelles via du stockage dans des batteries, possibilités de pilotage des usages, etc.

Cet axe vise à développer et fournir des outils et des méthodes pour gérer cette complexité croissante et assurer une exploitation optimale du système en tirant parti des leviers d'actions disponibles aujourd'hui mais, plus encore, en mettant à profit les nouvelles flexibilités.

Il conviendra d'étudier à chaque maille – poste, territoire, national et Europe – les modalités de pilotage optimales de ces nouveaux leviers afin d'en tirer la quintessence pour exploiter avec plus d'intelligence, d'automatisation, et d'anticipation le système tout en veillant à assurer sa résilience.



*Comme dans un cockpit d'avion de dernière génération, se développe pour le système électrique une couche de pilotage automatique capable de s'adapter intelligemment aux aléas et à la complexité croissante, de proposer des visions synthétiques au pilote tout en lui donnant opportunément la main dans certaines phases critiques.*



## LE PROJET iTESLA (Innovative Tools for Electrical System Security within Large Areas)



Le projet iTesla est une plate-forme de nouvelle génération permettant d'analyser des situations prévisionnelles du réseau couvrant un horizon temporel allant du J-2 au temps réel. L'objectif sous-jacent est d'optimiser les marges de sécurité en évitant de prendre des marges excessives et coûteuses tout en continuant à garantir un fonctionnement sûr du réseau.

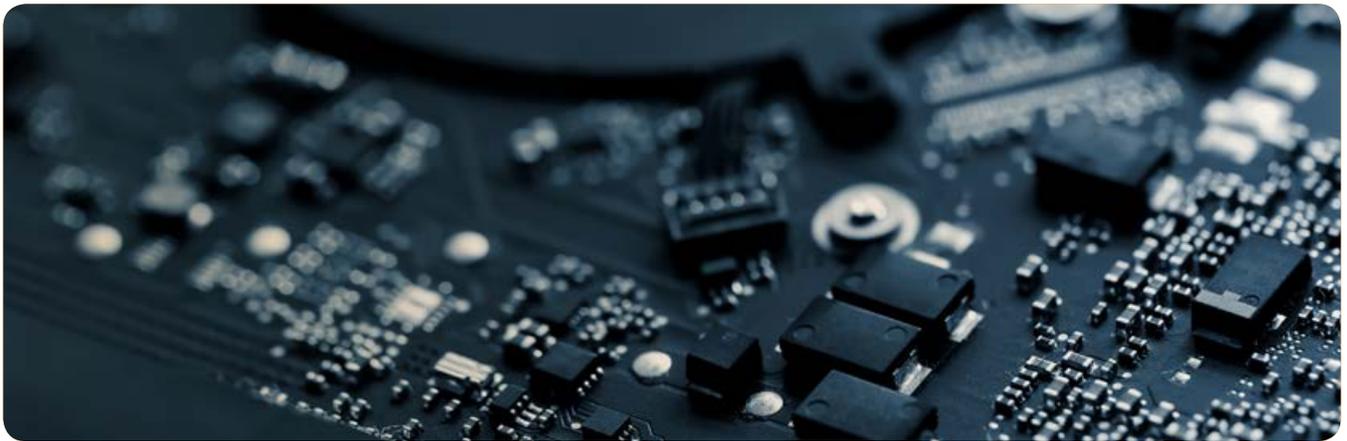
La plate-forme iTesla est un outil d'aide à la décision destiné à être utilisé à l'échelle d'un gestionnaire de réseau de transport (GRT) ou d'un ensemble de GRT (comme le centre de coordination CORESO par exemple).

Par rapport aux outils existants, iTesla apporte trois innovations majeures :

- ▶ Une modélisation des incertitudes affectant les injections intermittentes, les charges et les erreurs de prévision permettant de construire une approche probabiliste,
- ▶ Le recours à des simulations dynamiques car le réseau est exploité aujourd'hui plus près de ses limites (i.e. contraintes survenant pendant la phase transitoire suivant un incident, pertes de synchronisme, oscillations interzones mal amorties) et intègre des composants à base d'électronique de puissance dont le comportement dynamique doit être pris en compte,
- ▶ Une modélisation des actions préventives et correctives qui sont à disposition des opérateurs afin de les tester et les optimiser de manière automatique.

## Axe de recherche

### 「 MAÎTRISER LA STABILITÉ DU SYSTÈME DANS UN RÉSEAU EN MUTATION 」



La maîtrise du système électrique inclut la capacité à analyser les phénomènes transitoires afin de s'assurer que les signaux de courant et de tension, en tout point du réseau, sont cohérents avec les limites caractérisant les différents matériels afin d'en garantir le bon fonctionnement. RTE doit être également capable de s'assurer que ces phénomènes transitoires ne conduisent pas le système électrique dans un état dont le niveau de dégradation ne serait pas acceptable au regard des règles d'exploitation.

Les évolutions structurelles du réseau d'électricité liées à la transition énergétique pourraient rendre plus fréquents et/ou plus contraignants les phénomènes transitoires survenant sur le réseau.

La nature physique du système électrique change à la fois du côté production (éolienne, photovoltaïque), du côté du réseau (lignes à courant continu, contrôle commande numérique) et du côté des consommations (multiplication des appareils à base d'électronique).

La multiplication des composants à base d'électronique de puissance contribue de façon évidente à l'augmentation des phénomènes d'interaction et à une baisse de l'inertie du réseau d'électricité. La possible diminution des apports de courants de court-circuit sur le réseau (arrêt des réacteurs thermiques classiques et nucléaires) pose également question sur ce plan et sur le fonctionnement des protections.

Cependant, ces composants actifs constituent aussi de nouveaux leviers et donc des moyens de flexibilité pour le réseau d'électricité de demain qu'il convient d'utiliser de façon optimale.

Afin de poursuivre la réalisation d'études sur le comportement dynamique du réseau d'électricité, il est nécessaire :

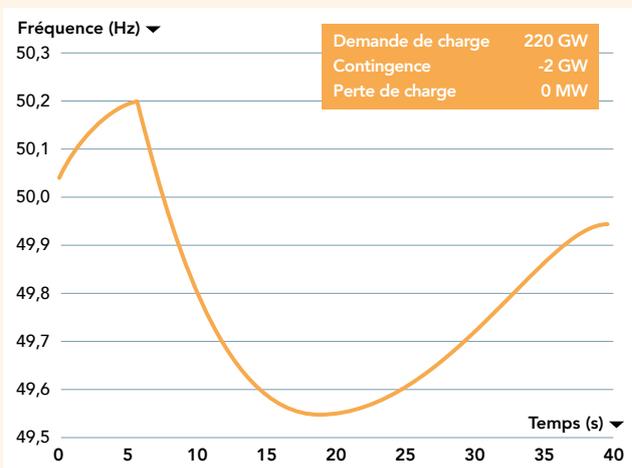
- de s'assurer en permanence de la bonne adéquation entre les modèles utilisés et les phénomènes transitoires étudiés ;
- de garantir que les outils de simulation utilisés pourront s'adapter à ces changements structurels, notamment pour intégrer des modèles détaillés à base d'électronique de puissance tout en conservant la capacité à étudier des phénomènes à une grande échelle (comportement de fréquence, effondrement de la tension, oscillations interzones).



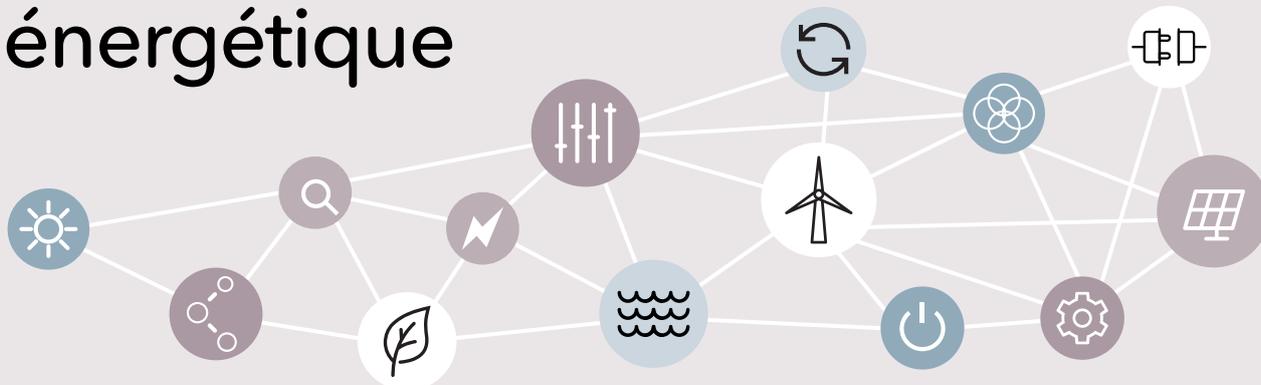
## LA LIMITATION DU PHOTOVOLTAÏQUE À 49,5 ET 50,2 Hz

La figure ci-contre représente une simulation de l'évolution de la fréquence de la zone européenne dans le cas d'une perte de 2 GW de consommation avec une part importante de production renouvelable se déconnectant à 50,2 Hz.

La perte de consommation génère dans un premier temps une forte augmentation de la fréquence, la fréquence traduisant l'équilibre production-consommation sur le réseau. Lorsque la fréquence dépasse 50,2 Hz, une importante part de la production de renouvelable se déconnecte, provoquant alors une chute de la fréquence traduisant le fait que la production ne peut répondre à la consommation. Le problème de sur-fréquence se transforme donc rapidement en un problème de sous-fréquence, avec un potentiel besoin de délester de la consommation rapidement. Finalement, les réglages centralisés du système électrique européen ajustent la production des centrales thermiques pour ramener la fréquence à 50 Hz. Ces excursions de fréquence sont d'autant plus amplifiées que le réseau est constitué de production photovoltaïque et éolienne (diminution de l'inertie du réseau).



# Développement optimal du réseau de la transition énergétique



## Les enjeux

Le réseau de transport d'électricité tient compte de l'évolution des moyens de production, des nouveaux modes de consommation et de l'évolution des bouquets énergétiques en France et en Europe. RTE anticipe ces mutations, prend en compte les évolutions environnementales et sociétales et adapte l'ensemble de ses outils. Le renouvellement, l'optimisation des équipements existants et la construction de nouvelles infrastructures contribuent à la sécurité de l'approvisionnement électrique, à la maîtrise des risques de coupures et à la consolidation d'un marché européen de l'électricité.

Le mouvement de transition énergétique engagé massivement à l'échelle européenne ainsi que l'émergence de solutions numériques offrant de nouveaux leviers d'optimisation des infrastructures modifient de façon radicale le contexte dans lequel doit être pensé le développement du réseau public de transport d'électricité.

Afin de garantir l'adéquation et l'efficacité des investissements futurs, les méthodes et outils actuellement mis en œuvre dans les études de développement du réseau doivent être révisés et adaptés à ce nouveau contexte.

Il s'agira aussi de questionner le socle de fondamentaux technico-économiques et la politique de risque qui guident les décisions d'investissement, en renforçant la cohérence et la coordination entre les horizons temporels du développement, de la maintenance et de l'exploitation.

Dans cette perspective, le programme « Développement optimal du réseau de la transition énergétique » s'articulera autour de deux axes de R&D, le premier visant à assurer une meilleure optimisation globale entre développement, maintenance et exploitation, le second à revisiter les méthodes et outils pour le développement et l'économie du réseau de transport d'électricité.

## Les axes de recherche

-  Assurer une meilleure optimisation globale entre développement, maintenance et exploitation

---

-  Revisiter les méthodes et outils pour le développement du système

## Axe de recherche

### 「 ASSURER UNE MEILLEURE OPTIMISATION GLOBALE ENTRE DÉVELOPPEMENT, MAINTENANCE ET EXPLOITATION 』



L'axe de R&D « Assurer une meilleure optimisation globale entre développement, maintenance et exploitation » vise à redéfinir le socle de fondamentaux technico-économiques et la politique de risque qui guident les décisions d'investissement, en s'attachant à assurer une cohérence renforcée entre les horizons temporels des investissements (qui peuvent différer en fonction du type d'actifs : lignes ou équipements de gestion dynamique du réseau), de la gestion des actifs, de la maintenance et de l'exploitation.

Dans un premier temps, cet axe sera notamment consacré à la finalisation du projet de recherche européen GARPUR ayant pour objectif de revisiter la règle du N-1 et de proposer des stratégies innovantes pour améliorer la capacité des gestionnaires de réseau de transport à gérer les risques qui pèsent sur le système électrique.

Cet axe a ensuite pour ambition d'explorer des critères technico-économiques envisageables pour les décisions d'investissement aux différents horizons temporels et d'évaluer leur adéquation dans le contexte futur (transition énergétique et nouveaux leviers). L'efficacité et la cohérence temporelle des décisions prises, compte tenu des incertitudes et des politiques de risque définies, seront des aspects clés de l'analyse.

Il s'agira également d'assurer une coordination entre les activités de R&D sur les méthodes et outils pour le développement du réseau et celles des programmes « Fonctionnement et exploitation du système électrique » et « Gestion des actifs », par exemple pour la modélisation des flexibilités ou la prise en compte de la maintenabilité du réseau.

## LE PROJET GARPUR

Les évolutions majeures que le système électrique est en train de connaître, en particulier l'intégration massive des énergies renouvelables et l'augmentation des échanges liés au marché de l'électricité, contribuent à rendre les flux sur le réseau de plus en plus volatils et imprévisibles.

GARPUR (Generally Accepted Reliability Principle with Uncertainty modelling and through probabilistic Risk assessment) est un projet européen financé dans le cadre du 7e programme cadre de recherche de la Commission européenne mené par un consortium de 20 partenaires, dont RTE, réunissant à la fois des universitaires et des gestionnaires de réseau de transport.

Lancé en septembre 2013 pour une durée de 4 ans, il vise à revisiter la règle du N-1 à la lumière des évolutions du système et à proposer des stratégies innovantes, adéquates et efficaces pour assurer la fiabilité des réseaux électriques.

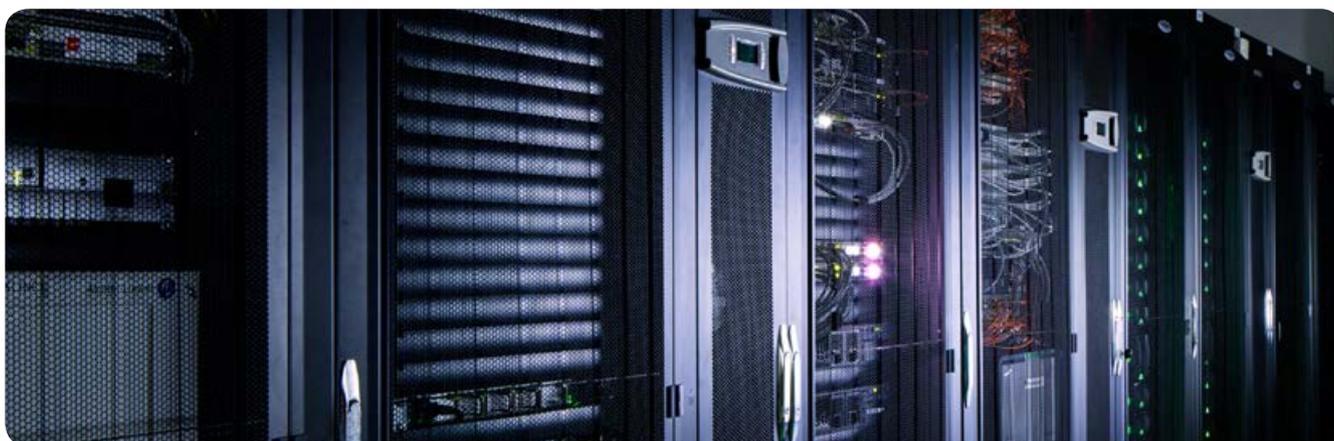
Le défi majeur de GARPUR est d'exprimer le lien entre les décisions prises par un gestionnaire de réseau de transport pour satisfaire un critère de sécurité (telle la règle N-1) avec les impacts socio-économiques qui en résultent.

Une traduction mathématique se fera sous la forme d'un problème d'optimisation sous contraintes, au travers duquel on cherchera à minimiser les coûts complets du réseau tout en garantissant un niveau de sûreté satisfaisant pour les utilisateurs finaux. En particulier, les probabilités d'occurrence des défauts, ainsi que leurs conséquences en cas de réalisation, interviendront explicitement dans la recherche du meilleur compromis. La prise en compte des interactions entre les investissements réalisés en développement ou en gestion des actifs avec la sûreté réseau en temps réel sera également étudiée. De même, le bénéfice apporté par une bonne coordination entre GRT sera mis en évidence. Afin de prouver l'existence de critères de sécurité plus optimaux que le N-1, une plate-forme de quantification sera développée au cours du projet.



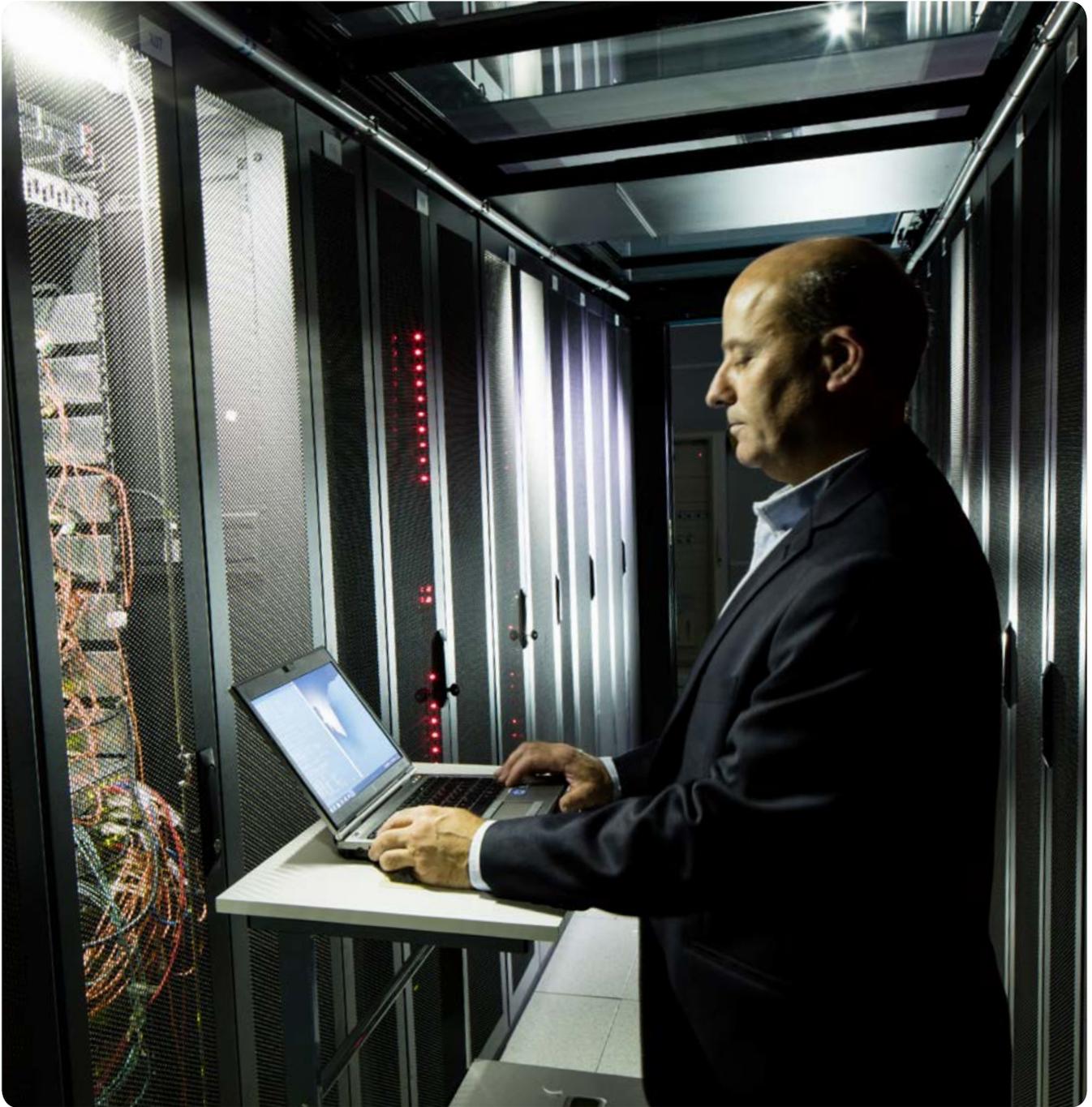
## Axe de recherche

### 「 RENFORCER LA R&D SUR LES MÉTHODES ET OUTILS POUR LE DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME 」

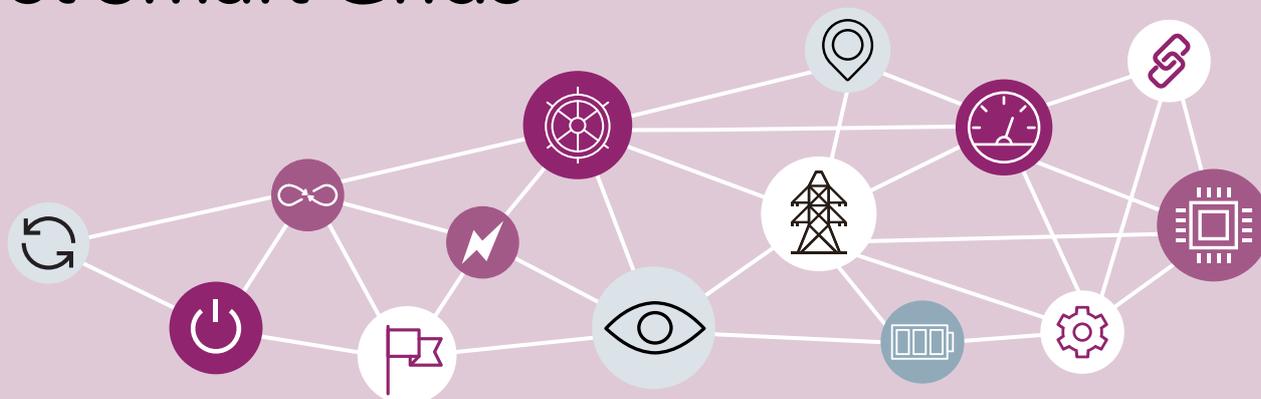


Afin de garantir l'adéquation et l'efficacité des investissements futurs, les méthodes et outils actuellement mis en œuvre dans les études de développement du réseau doivent être revisités et adaptés au contexte de transition énergétique et en tenant compte de l'émergence de solutions numériques qui offrent de nouveaux leviers d'optimisation du système électrique. Les travaux de cet axe de R&D ont pour objectif d'apporter des réponses méthodologiques et des solutions logicielles (modèles de fondamentaux technico-économiques et modèles d'étude de réseau) aux enjeux suivants :

- une hiérarchie historique des réseaux (répartition, grand transport, interconnexion) remise en cause par la croissance des capacités d'interconnexion, qui déplace progressivement les goulots d'étranglement vers les réseaux de grand transport internes, et par le déplacement massif des moyens de production vers les réseaux de répartition et de distribution ; les méthodes et outils devront évoluer vers des dimensions plus européennes et plus locales ;
- une influence accrue du climat et le besoin de mieux caractériser les aléas qui en découlent ;
- une modification des usages de consommation ;
- un contexte plus incertain (transition), laissant présager des ruptures dans l'évolution future du système électrique, dans lequel il devient nécessaire d'explorer un plus grand nombre de scénarios pour tester la robustesse des stratégies, d'identifier les stratégies de moindres regrets, ... ;
- le besoin d'adaptation du réseau à un réarrangement en profondeur des flux (et la perspective d'une décroissance des volumes d'énergie soutirés mais pas forcément de la puissance maximale à transiter), incitant à considérer des solutions de flexibilité innovantes (automates réseau, pilotage des consommations, ajustement des productions EnR, stockage) comme solutions d'optimisation du développement du réseau ;
- en corollaire d'une optimisation accrue du développement du réseau, la diminution des marges disponibles pour l'exploitation et la maintenance et par conséquent la nécessité de mieux prendre en compte les contraintes d'exploitation dans les études de développement.



# Prospective, économie et Smart Grids



## Les enjeux

Le système électrique français et européen s'est construit au fil du temps autour de moyens de production de forte puissance et de réseaux de transport de plus en plus interconnectés, ce maillage étant, avec des mécanismes de marché adaptés, techniquement et économiquement le plus pertinent pour mutualiser les ressources, voire les secours à large échelle.

Avec l'arrivée d'installations de production décentralisée, de nouveaux acteurs technologiques (stockage, consomm'acteurs, véhicules électriques, réseaux de distribution actifs) ou institutionnels (métropoles, territoires) et la volonté de développer une approche multi-énergies (interactions entre les réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur), le développement du système pourrait emprunter différentes voies durant les décennies à venir.

Différents scénarios sont ainsi envisageables, répondant chacun à des politiques énergétiques locales, nationales ou européennes, mais aussi à des signaux économiques exogènes. Chacun de ces scénarios appellera un besoin de réseau de transport particulier : il est donc impératif de quantifier ce besoin pour anticiper le rôle du réseau (transport, assuranciel) et « in fine » son modèle économique.

Le programme « Prospective, économie et Smart Grids » a vocation à balayer ces futurs possibles, à en évaluer les conditions d'avènement puis à évaluer leurs conséquences sur le rôle de RTE.

Cette quantification pourra s'appuyer sur des démonstrateurs (projets pilotes Smart grids ou de déploiement) comme sur de la simulation numérique. Elle fournira des éléments de discussion sur lesquels RTE pourra s'appuyer pour orienter ses choix stratégiques internes comme pour travailler avec l'externe (collectivités territoriales, ministères, etc.).

Des travaux de prénormalisation (CIGRE) et de normalisation seront suivis plus précisément afin de publier la vision des gestionnaires de réseau de transport, notamment sur le fonctionnement des marchés de détail et ses articulations avec le marché de gros.

## Les axes de recherche

-  Développer des visions prospectives du secteur électrique et énergétique et questionner le modèle économique
-  Proposer de nouvelles architectures de marché et de nouveaux schémas réglementaires
-  Définir les technologies et les modèles économiques pertinents de stockage pour le système électrique et RTE
-  Comprendre et accompagner la stratégie énergétique des territoires et leur proposer de nouveaux services
-  Quantifier la valeur technico-économique des nouvelles flexibilités testées sur le système électrique

## Axe de recherche

### 「 DÉVELOPPER DES VISIONS PROSPECTIVES DU SECTEUR ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE ET QUESTIONNER LE MODÈLE ÉCONOMIQUE 』



Le secteur électrique, et plus largement énergétique, va évoluer à travers la transition énergétique en cours, et ce avec une ampleur quasiment sans précédent historique : le mouvement est à la fois mondial, transverse à toute la société et particulièrement concentré dans le temps (20 à 30 ans). Développer une vision prospective du secteur électrique doit impérativement se faire en intégrant les enjeux énergétiques dans leur ensemble avec une perspective systémique et la conscience du délai court qui nous est accordé pour prendre les décisions. La construction d'une telle vision doit s'appuyer sur un large ensemble de partenariats et de nouveaux acteurs différents, avec leurs propres motivations. L'approche deviendra fondamentalement multicritères et multi-échelles. La R&D mènera des études prospectives afin de quantifier les impacts des différents scénarios sur le système électrique en général et RTE en particulier.

Les principes fondant le TURPE n'ont pas beaucoup évolué depuis l'ouverture des marchés au début des années 2000, l'enjeu principal des pouvoirs publics à l'époque étant alors d'inciter les

gestionnaires de réseau régulés à réaliser les investissements nécessaires. Ce modèle a bien fonctionné : la Commission de régulation de l'énergie a systématiquement approuvé les plans d'investissement de RTE qui sont passés de 700 millions d'euros à 1,5 milliards d'euros en quelques années.

Mais le contexte a changé : développement massif de la production décentralisée, stagnation de la consommation, évolutions de la structure capitaliste des GRT ou encore conscience environnementale plus aiguë questionnent le modèle réglementaire et économique actuel de RTE. Les régulateurs, ainsi que la Commission européenne, souhaitent réorienter le modèle tarifaire pour promouvoir l'innovation et inciter les GRT à développer des solutions numériques et télécoms. Une évolution importante des structures des tarifs et des incitations des opérateurs régulés est probablement à venir. La R&D peut appuyer les équipes en charge des négociations tarifaires par des travaux et simulations de fond, afin de garantir la cohérence entre signaux économiques et l'évolution de fond du système électrique

## Axe de recherche

### PROPOSER DE NOUVELLES ARCHITECTURES DE MARCHÉ ET DE NOUVEAUX SCHÉMAS RÉGULATOIRES »



La baisse des prix des combustibles et l'introduction de volumes importants d'EnR créent une pression à la baisse des prix de marché. Il est encore délicat de dire si ce problème est structurel ou conjoncturel, mais l'impact sur les grands groupes énergétiques européens est tel que les gestionnaires de réseau de transport, responsables de la sécurité d'approvisionnement, acteurs neutres disposant de l'expertise et de la vision d'ensemble du système, et maîtres d'œuvre des bourses de l'électricité, doivent étudier en détail le fonctionnement prévisionnel des marchés dans les prochaines années.

Des faiblesses du fonctionnement des marchés apparaissent comme structurelles, et notamment sa capacité à rémunérer des investissements capitalistiques importants, et plus encore à en déduire des signaux sur les besoins d'investissement. La suppression du plafond sur les prix de marché suffirait-il à motiver des investisseurs rémunérés sur des pics de prix peu fréquents, et à éviter la mise en place de mécanismes sécurisant l'approvisionnement dans divers pays européens (mécanisme de capacités, réserves stratégiques, etc.) ?

La question de la valorisation des actifs du système électrique par rapport aux services rendus ne touche pas que les moyens de production : la valorisation des projets d'interconnexion par exemple est plus basse dans les dernières estimations que par le passé. Cela vaut aussi pour les autres leviers utiles au système électrique : la gestion dynamique de la demande et le stockage.

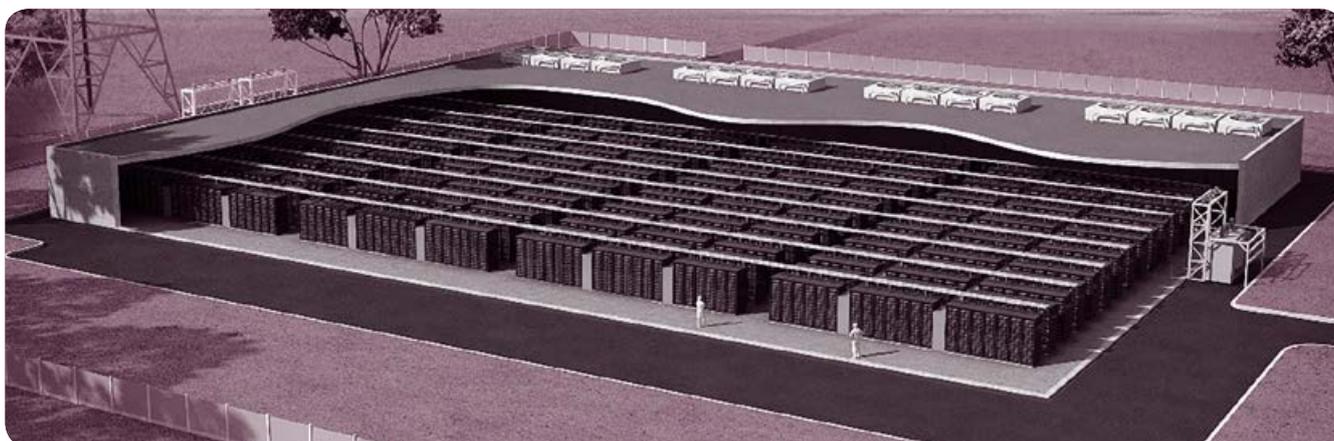
Les principaux sujets de cet axe de recherche éclaireront :

- les enjeux économiques associés aux différentes options de déclinaison du code réseau européen « Electricity Balancing » pour promouvoir les plus pertinentes,
- les évolutions envisageables du mécanisme de capacité français,
- les mécanismes de soutien aux EnR.

Pour tester et quantifier les évolutions d'architecture de marché ou de schémas réglementaires, des outils de simulation numériques seront développés.

## Axe de recherche

### 「 DÉFINIR LES TECHNOLOGIES ET LES MODÈLES ÉCONOMIQUES PERTINENTS DE STOCKAGE POUR RTE ET LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE 」



Le développement de différentes filières de stockage avec une baisse continue des coûts en fait, pour l'avenir, une solution parmi d'autres pour l'évolution du système électrique, évolution qui concerne l'ensemble des acteurs puisque le stockage peut rendre différents services sur toute la chaîne de valeur.

Que ce soit pour ses besoins propres (congestions résiduelles sur certaines parties de réseau) ou plus largement sur la capacité de ces dispositifs à être massivement déployés, RTE doit quantifier la valeur technique et économique des différents équipements et se positionner sur l'optimisation de leur utilisation. Ceci passera par l'accompagnement de déploiements dans les postes (**RINGO I**), un projet européen, des partenariats ad hoc (GRTgaz) voire de participation possible à des projets pilotes sur d'autres technologies que la batterie électrochimique.



Conteneurs de batteries.

## LES LIGNES VIRTUELLES, LES RINGO

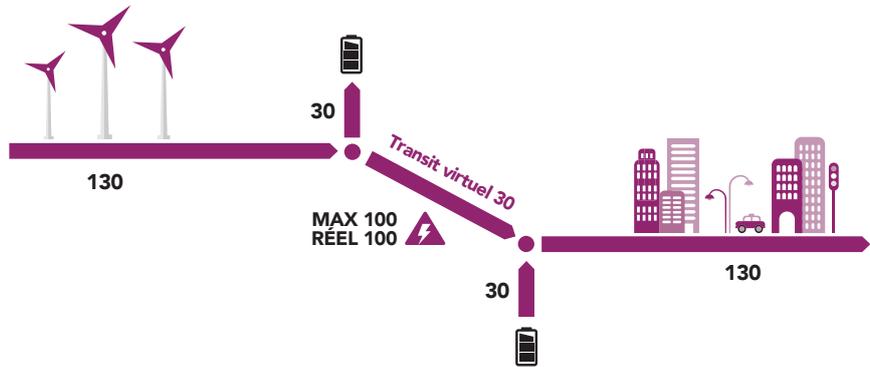
Les lignes virtuelles sont mises en place pour éviter des congestions intermittentes, en opérant, à bilan énergétique nul, un ensemble d'équipements de stockage répartis sur le réseau.

En présence de congestions, les équipements RINGO situés à différents nœuds du réseau sont pilotés conjointement grâce à un logiciel. L'électricité est soutirée sur le réseau par l'équipement RINGO situé en amont de la congestion et elle est injectée sur le réseau par l'équipement RINGO situé en aval de la congestion, pour un bilan nul. Cette phase est appelée « phase d'activation ».

En l'absence de congestions, les équipements RINGO sont ramenés à leur état initial par des mouvements symétriques, afin d'être prêts à gérer de nouvelles congestions. Cette phase est appelée « phase de reconstitution ». Le bilan énergétique de ces différents mouvements d'électricité est nul.

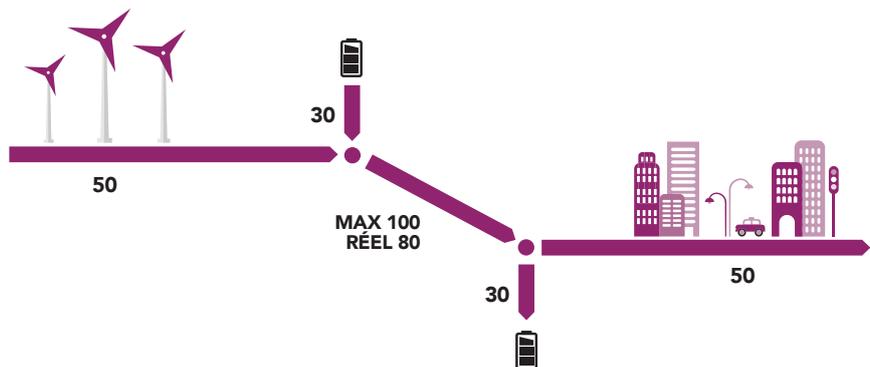
### 1. PHASE D'ACTIVATION

On réalise un transit « virtuel » de 30 en plus du transit réel de 100. La ligne virtuelle permet au réseau d'assumer une pointe à 130 % de la capacité nominale de la ligne réelle.



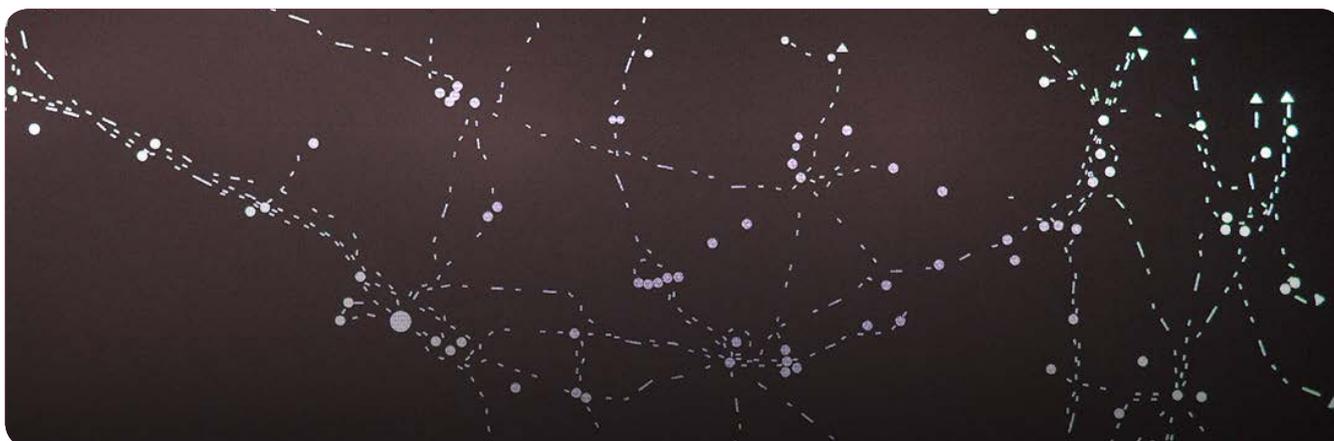
### 2. PHASE DE RECONSTITUTION

On profite d'une période où la ligne réelle est en sous-charge (ici 50 % de sa capacité) pour ramener les batteries dans leur état initial. C'est maintenant que le transit virtuel de 30 est réellement effectué. Les batteries ont permis un décalage dans le temps du transit.



## Axe de recherche

### 「 **COMPRENDRE ET ACCOMPAGNER LA STRATÉGIE ÉNERGÉTIQUE DES TERRITOIRES ET LEUR PROPOSER DE NOUVEAUX SERVICES** 」



À l'échelle mondiale, les villes intelligentes (Smart Cities), appelées aussi villes durables, connectées, numériques ou encore respirables, s'imposent comme un lieu emblématique du développement des territoires de demain. Au niveau français, les métropoles se sont, par ailleurs, vues dotées de nouvelles compétences dans la loi de programmation sur la transition énergétique et la loi MAPTAM. Elles sont désormais légitimes à piloter un certain nombre d'actions dans le domaine de l'énergie.

Dans le paysage politico-économique national, il apparaît donc indispensable de personnaliser les relations de RTE avec les territoires en s'appuyant sur des outils de dialogue, en partie à construire, allant des outils pédagogiques à des outils supports d'offres de service. Les attentes des collectivités étant multi-énergie, une approche commune avec d'autres acteurs de l'énergie semble prometteuse et souhaitable.

Les enjeux pour RTE sont donc :

- de faire connaître des services apportés par le réseau de transport pour le développement des métropoles (pédagogie sur le rôle actuel de RTE) ;
- d'accompagner les territoires dans leurs études prospectives énergétiques et qualifier en commun le besoin de pérennisation, voire de développement, des infrastructures à travers le prisme de la métropole et du territoire,
- de sensibiliser les territoires aux enjeux de mutualisation des ressources aux échelles française et européenne.



## Axe de recherche

### 「 QUANTIFIER LA VALEUR TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES NOUVELLES FLEXIBILITÉS TESTÉES SUR LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE 」



Grâce notamment aux technologies du numérique, l'exploitation du système électrique en temps réel va gagner en leviers de flexibilité. Les interactions vont s'intensifier entre acteurs, il sera possible d'accentuer l'optimisation et l'utilisation des ressources disponibles, que ce soient les ressources de production, de consommation/effacement, de stockage mais aussi les ressources réseau qui seront de plus en plus monitorées. Les réseaux électriques intelligents doivent participer à un meilleur service rendu, que ce soit économique, environnemental ou encore sociétal.

La technologie ne devrait pas être un verrou. Mais la valorisation de ces nouvelles technologies et fonctions reste à calculer et évoluera dans les années à venir et peut dépendre des acteurs, selon qu'ils privilégient les valeurs économique, environnementale ou sociétale.

Les démonstrateurs ont été un lieu de test à petite échelle. Les grands déploiements prévus dans les quatre ans qui viennent (les projets Smile, FlexGrid dans le cadre de l'action 6 du **PLAN INDUSTRIEL « RÉSEAUX ÉLECTRIQUES INTELLIGENTS »** mais également les autres régions) vont permettre d'affiner les stratégies d'évolution des matériels et logiciels avec, probablement, des conclusions montrant la particularisation des solutions les meilleures selon les configurations du système.

Outre les retours de ces grands chantiers, les outils de simulation ad hoc évolueront pour effectuer ces calculs, outils qui pourront être mutualisés avec d'autres acteurs du monde de l'énergie.



## LE PLAN INDUSTRIEL « RÉSEAUX ÉLECTRIQUES INTELLIGENTS »

Le plan « Réseaux Électriques Intelligents », mené dans le cadre de la Nouvelle France Industrielle lancée par le Président de la République en 2013, a vocation à consolider la filière Smart Grids française sur de nouveaux marchés à forte croissance et créateurs d'emplois.

Dans ce cadre, RTE participe à certaines actions lancées dans le cadre du plan :

► **ACTION « FÉDÉRER »** – L'association ThinkSmartGrids a été créée le 15 avril 2015. RTE en a pris la première présidence jusqu'en septembre 2015. Depuis, RTE assure la vice-présidence et, à ce titre, est également membre du bureau. En tant que membre adhérent, RTE est membre du Conseil d'Administration ;

► **ACTION « PROMOUVOIR »** – RTE est présent dans la Commission internationale qui décide des orientations de la promotion de l'association. RTE participe notamment à différents salons sous la bannière de l'association, pour sponsoriser et épauler l'offre française en matière de Smart grids ;

► **ACTION « JEUNES POUSSÉS »** – RTE participe à la Commission Grands groupes/PME. Il a contribué à la rédaction de la charte relative à leurs relations ;

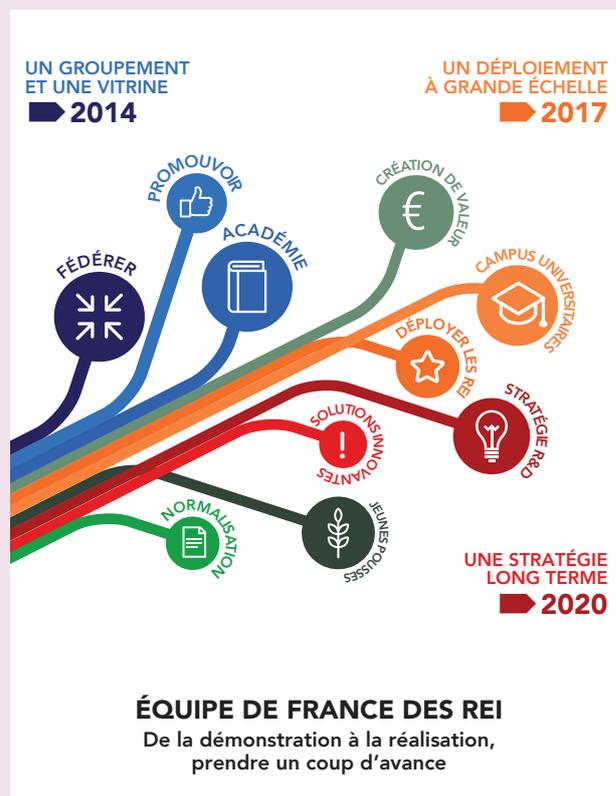
► **ACTION « CRÉATION DE VALEUR »** – RTE a piloté un premier rapport collégial sur la valeur socio-économique des Smart grids, qui a été rendu public en juillet 2015. RTE a été mandaté par les ministres de l'Economie et de l'Energie pour approfondir, en copilotage avec l'ADEME, ces travaux, l'objectif étant de sortir un second rapport fin 2016/début 2017 ;

► **ACTION « DÉPLOYER LES REI »** – Encadrée par l'article 200 de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, cette action vise à déployer à grande échelle, entre 2017 et 2020, des solutions matures ou proches de la maturité industrielle sur une zone géographique étendue. RTE va déployer un socle de solutions dans les deux régions sélectionnées par les ministères de l'Economie et de l'Energie : l'Ouest (projet Smile) et le Sud-Est (projet FlexGrid) entre 2017 et 2020 ;

► **ACTION « CAMPUS UNIVERSITAIRES »** – RTE s'investit dans la mise en place des 4 campus (Lille, Saclay, Grenoble et Nice) ;

► **ACTION « STRATÉGIE R&D »** – RTE est membre du Conseil scientifique de l'association et, à ce titre, participe à l'élaboration de notes de position au nom de l'association ;

► **ACTION « SOLUTIONS INNOVANTES »** – RTE a lancé un concours sur le monitoring en février 2015 auprès des start-ups françaises. Quatre entreprises ont été retenues et sont désormais parties prenantes d'expérimentations sur nos installations afin d'en juger la valeur. RTE prévoit le lancement d'un nouveau concours de ce type en 2017.





Direction Recherche et Développement

Cœur Défense  
100, esplanade du Général de Gaulle  
92931 La Défense  
[www.rte-france.com](http://www.rte-france.com)

Crédits photos : Lionel Astruc, Olivier Banon,  
William Beaucardet, François Chevreau,  
Thierry Colle, Jean-Lionel Dias,  
Sylvie Legoupi, Thomas Moren,  
Franck Oddoux, Lionel Roux, Elisabeth  
Schneider, Seignette Lafontan  
et Médiathèque RTE.