



Le réseau
de transport
d'électricité



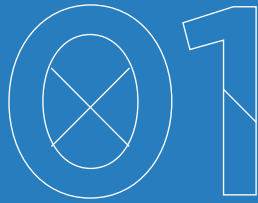
CAP R&D

FEUILLE DE ROUTE R&D 2021/2024



01 — INTRODUCTION	4
02 — LES FINALITÉS DE LA R&D	6
2.1 Réussir 2025: l'horizon opérationnel	7
2.2 Préparer 2030: une part croissante d'énergies renouvelables et des infrastructures vieillissantes	9
2.3 Anticiper 2040-2050: la neutralité carbone	11
03 — PROGRAMMES DE R&D	14
3.1 Programme Stabilité du système	16
3.1.1 Stabilité d'un système en forte mutation	16
3.1.2 Simulateurs électrotechniques du fonctionnement du système	19
3.2 Programme Pilotage du système	21
3.2.1 Flux, Assistant salles H24	22
3.2.2 EOD, Assistant salles H24	24
3.2.3 Prévisions court terme	26
3.3 Programme Gestion des Actifs	28
3.3.1 Assistant salles H24 matériels	29
3.3.2 Automatisation de l'inspection du réseau et moyens d'intervention	31
3.3.3 Prédire le comportement des équipements	33
3.3.4 Systèmes d'Aide à la Gestion des Actifs	35
3.4 Programme Futurs cyber-physiques et éco-conçus des infrastructures du réseau	37
3.4.1 Architecture de pilotage du système hybride cyber-physique	37
3.4.2 Contrôle Commande	39
3.4.3 Électronique de puissance et courant-continu	41
3.4.4 Futurs des infrastructures LIAISONS	43
3.4.5 Futurs des infrastructures POSTES	44
3.5 Programme Environnement, Société et Prospective	46
3.5.1 Éco-conception, analyses environnementales et de résilience	48
3.5.2 Réseau et Biodiversité: comprendre et régénérer	51
3.5.3 Gouvernance et régulation en phase avec la société	53
3.5.4 Énergie, Réseau et Société	55
3.5.5 Système énergétique futur	57
3.6 Programme Climat, Équilibre Offre-Demande et Réseau Long Terme	59
3.6.1 Climat, météo et impacts sur le système électrique	60
3.6.2 Évolution du réseau	63
3.6.3 Modélisation Équilibre Offre-Demande long terme	65
3.7 Activités de R&D transverses	67
3.7.1 Numérique pour Observer, Prédire et Décider	67
3.7.2 Open R&D	70





Introduction



La Recherche & Développement de RTE innove pour réussir les transitions énergétique et écologique, et ce en co-construisant ses solutions avec des acteurs majeurs aux domaines de compétences très variés: électrotechnique, sciences des matériaux, mécanique, économie, numérique, mathématiques appliquées, éco-conception, ou encore sciences humaines et sociales.

POURQUOI L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE NÉCESSITE DES TRAVAUX DE R&D ?

Le système électrique est aujourd'hui en pleine mutation sous l'effet de deux drivers importants : la transition énergétique d'une part et l'apport des technologies numériques d'autre part. Le premier engendre le déploiement d'énergies renouvelables dont le comportement, tant en termes de prévisibilité, de pilotabilité que de comportement électro-technique, n'a rien de comparable aux centrales de production classiques. Cet impact croissant nécessite d'adapter fortement nos outils et process métiers afin de garantir une exploitation en toute sécurité dans les décennies à venir. Le numérique a quant à lui deux impacts majeurs : premièrement, il permet d'instrumenter plus finement nos installations et d'optimiser l'utilisation de nos actifs afin d'avoir une performance au meilleur coût, deuxièmement il autorise des interactions beaucoup plus fortes entre acteurs du système électrique (fonctionnellement et spatialement), ce qui permettra d'avoir accès à des gisements croissants de flexibilité en temps réel. La mise en œuvre de ces technologies, l'identification des solutions les plus pertinentes nécessitent en amont des travaux de recherche et des démonstrateurs qui qualifient les ratios coûts/bénéfices afférents.

POURQUOI CETTE FEUILLE DE ROUTE ?

Détailler la feuille de route R&D de RTE pour la période de 2021 à 2024 permet d'en expliciter le cap, les enjeux et les conditions de réussite, d'en partager également publiquement les attendus afin de recueillir remarques, questions ou encore initier des collaborations. Sur le fond, durant cette période, il faudra, d'une part, déployer les solutions développées et validées par la R&D au fil du temps, c'est-à-dire organiser avec les métiers leur mise en exploitation ; et, d'autre part, continuer à innover dans nos domaines d'excellence, orienter les nouveaux champs d'exploration en phase avec les objectifs politiques environnementaux, en ligne avec la SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone) au niveau français ou le Green Deal au niveau européen. Les transformations nécessaires sont profondes, le temps est compté, aussi la R&D doit être au rendez-vous pour définir les solutions optimales qui devront être mises en place au bon moment dans le futur. Les objectifs présentés dans cette feuille de route de 2021 à 2024 veulent donc fournir des briques nécessaires pour avancer sereinement sur la route de la neutralité carbone en 2050, avec des points de passage intermédiaires.

QUELLES AVANCÉES PROMET LA R&D DE RTE ?

Les attentes sont différentes selon les horizons de temps :

- **L'horizon 2025 est celui de la performance opérationnelle** : RTE **déploie** dans ses métiers les solutions de R&D qui sont éprouvées : il s'agit principalement de solutions d'aide à la décision pour aider les opérateurs à exploiter un système électrique de plus en plus complexe,
- **L'horizon 2030 est celui d'un impact significatif des Énergies Renouvelables et d'un palier à franchir face au vieillissement de nos infrastructures** : Face à ce besoin croissant de nouvelles lignes, la R&D **prépare** avec les métiers des solutions pour dimensionner le réseau au plus juste ; celles-ci tireront parti des leviers numériques afin de modifier l'exploitation du réseau, son développement, sa maintenance et son renouvellement,
- **L'horizon 2040-2050 est l'horizon de la neutralité carbone**. La SNBC et le Green Deal engagent la France et l'Europe vers la neutralité carbone, la régénération de la biodiversité et l'économie circulaire. Pour tenir cette cible, différents futurs du système énergétique sont envisageables, ie en termes de production, réseaux et usages de l'énergie. La R&D conçoit des méthodes et outils pour explorer et évaluer les scénarios possibles ; elle **conçoit** également les caractéristiques des futures infrastructures du réseau électrique, en y intégrant les objectifs environnementaux du Green Deal dès la conception. L'horizon 2040-2050 est l'horizon de l'éco-conception.

N'EST-CE PAS DIFFICILE DE SE PROJETER À 2050 ?

Si la SNBC et le Green Deal donnent des objectifs clairs, les incertitudes sont effectivement grandes quant à leur traduction concrète et au chemin à emprunter pour y parvenir.

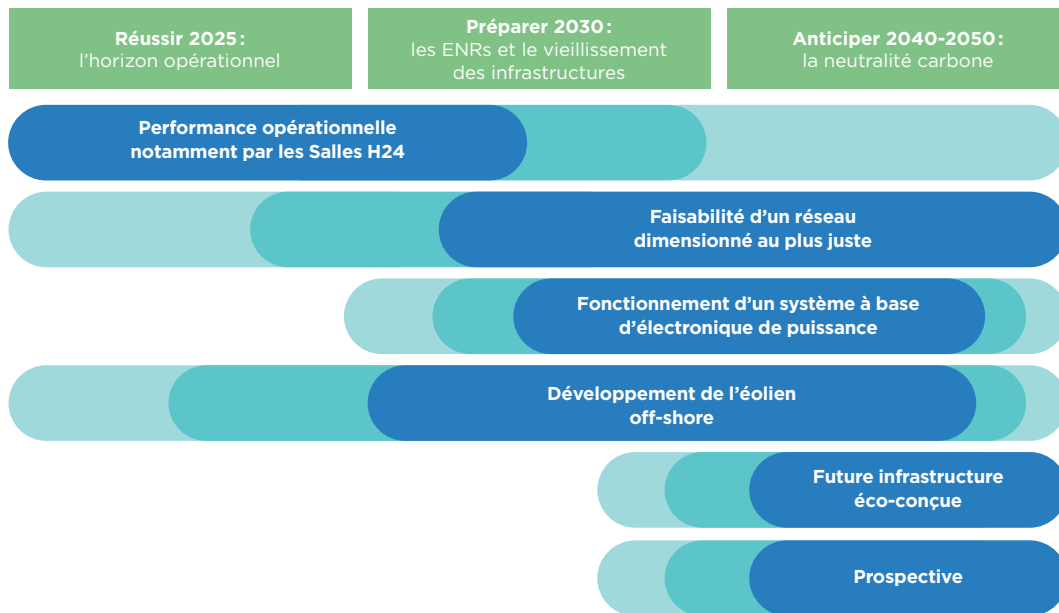
D'où l'intérêt, dès maintenant, de scénariser ces futurs possibles, en évaluer les impacts selon différents critères et acter de certains choix en connaissance de cause. Dans le domaine des infrastructures énergétiques, contrairement au numérique, ces choix sont particulièrement engageants car impliquant des actifs avec des durées de vie de 60 ans, voire plus. Les solutions visées dans cette feuille de route de 2021 à 2024 devront évidemment être conçues sous incertitude de ce qui peut arriver ultérieurement et intégrer au maximum un tronc commun de solutions « sans regret » qui trouveront leur utilité quoiqu'il arrive. Une grille d'évaluation multicritères (performance technico-économique, solidarité, environnement, sobriété, résilience, etc...) pourra à ce titre être utilisée, quand c'est possible, pour caractériser et retenir les solutions les plus pertinentes et robustes.



Les finalités de la R&D



La R&D contribue à 6 grandes finalités, inscrites dans différents horizons temporels, et schématisées ci-dessous (l'intensité de la couleur traduit l'effort prévu sur chaque horizon) :



2.1 RÉUSSIR 2025 : L'HORIZON OPÉRATIONNEL

PERFORMANCE OPÉRATIONNELLE NOTAMMENT PAR LES CENTRES DE SUPERVISION TEMPS RÉEL

À l'horizon 2025, la finalité dominante des actions de R&D est la performance opérationnelle. L'objectif est de déployer, dans les futures « Salles H24 » de RTE, de nouveaux outils d'aide à la décision pour les opérateurs qui gèrent en temps réel l'exploitation des flux, l'équilibre offre-demande (EOD), la supervision des matériels électriques, informatiques et télécom.

Les gains de performance de premier ordre sont obtenus par une amélioration de la sécurité et la qualité du service, une économie de gestion du système, une économie de maintenance et d'investissement.

Au-delà de ces gains de premier ordre, les outils issus de la R&D ont un effet de levier annexe en automatisant certaines tâches fastidieuses, libérant ainsi du temps aux opérateurs pour des tâches à forte valeur ajoutée.

SCOOP (Schedule Optimisation of Operation Planning), outil d'aide à la planification des travaux.

Le gain de 1^{er} ordre est la qualité de la planification : SCOOP aide à trouver le meilleur compromis entre les bénéfices attendus des travaux et les contraintes que ces travaux font immédiatement porter sur l'exploitation (mise hors tension d'ouvrages).

Le gain de 2nd ordre se compte en temps nécessaire à l'opérateur pour construire son planning : un temps maîtrisé malgré la hausse de la complexité (cf. la variabilité croissante des flux liés aux productions d'électricité solaire et éolienne).

CONTEXTE DE LA MISE EN PLACE DES FUTURES SALLES H24 À RTE

L'intégration massive des énergies renouvelables intermittentes et l'augmentation des besoins de renouvellement induite par le vieillissement du réseau nécessiteront de trouver des modes d'exploitation optimisés et plus flexibles, en s'appuyant notamment sur des solutions numériques (automates, capteurs...) et des moyens de télécommunications renforcés. Dans le même temps, le raccordement des parcs éoliens en mer et le développement des interconnexions constituent des projets industriels d'envergure. La stratégie industrielle de RTE repose sur la planification sur le temps long pour réduire les coûts, la standardisation des matériels, la mutualisation des infrastructures (par exemple pour le raccordement des éoliennes en mer) et le recours aux technologies du numérique pour pousser un cran plus loin l'utilisation des lignes existantes, réduire le besoin d'adaptation du réseau et optimiser le renouvellement des infrastructures les plus anciennes.

Afin d'être en capacité de répondre à ces enjeux, la supervision en temps réel des flux, du matériel et des systèmes d'information, de façon coordonnée, devient indispensable pour assurer une performance optimale. C'est ainsi que l'ambition des salles H24 est née.

À l'horizon 2026, 9 salles H24 devront permettre de conduire et de superviser les flux et d'administrer en temps réel les échanges d'informations relatifs à l'exploitation et à la maintenance des réseaux électrique et numérique. Les évolutions envisagées se matérialiseront par une adaptation significative des modes de fonctionnement à l'échelle nationale et régionale. En effet, cela va conduire à transformer des métiers sur les sites de RTE, à déplacer des activités d'un bassin d'emploi à un autre. C'est la raison pour laquelle la direction de RTE a souhaité associer l'ensemble des salariés à la démarche de construction de cette transformation mais également les accompagner individuellement dans leur projet professionnel. Bien plus qu'une adaptation industrielle et technique, il s'agit pour RTE d'une véritable transformation de la manière d'exercer ses métiers avec une véritable dimension humaine et sociale.



Figure: Modélisation 3D des Salles H24, photo indicative - Projet

2.2 PRÉPARER 2030 : UNE PART CROISSANTE D'ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES INFRASTRUCTURES VIEILLISSANTES

FAISABILITÉ D'UN RÉSEAU DIMENSIONNÉ AU PLUS JUSTE

Dès l'horizon 2030, l'intégration des énergies renouvelables (ENRs) et le vieillissement du réseau induisent une vague de nouvelles infrastructures dont le développement devra être optimisé en volume et dans le temps, afin de limiter les ressources financières, humaines, foncières, ainsi que les empreintes environnementales et paysagères. La stratégie industrielle de RTE, formalisée par le Schéma Décennal de Développement du Réseau (SDDR) et validée par le régulateur (délibération de la CRE N°2020-200 du 23 juillet 2020) consiste à dimensionner le réseau au plus juste. Cette stratégie s'appuie sur deux leviers issus de concepts R&D.

Le premier levier vise à optimiser la gestion des « actifs », ie tous les composants de l'infrastructure de réseau. Le but est notamment de renouveler les matériels en fonction de leur performance mesurée ou estimée, plutôt qu'à un âge normatif prédéfini à l'avance, tout en respectant les critères de sécurité d'exploitation. Ceci passe par une optimisation conjointe de la maintenance et du renouvellement (voir encadré). Plus généralement, il faut déterminer les stratégies de gestion d'actifs qui apporteront le meilleur bénéfice entre le service rendu et les ressources mobilisées. Ces optimisations étant impossibles à réaliser avec des outils de bureautique génériques, la R&D développe la chaîne d'outils Système d'Aide à la Gestion des Actifs (SAGA). Ces simulations permettent par ailleurs d'objectiver les besoins de ressources de toute nature, ce qui est un élément essentiel pour établir des trajectoires budgétaires consolidées.

La peinture, exemple de l'optimisation entre maintenance et renouvellement.

Vaut-il mieux repeindre les pylônes ou les laisser vieillir et les renouveler plus souvent ? La simulation numérique SAGA-MONA (MONA: Management and Optimisation Network Asset) montre que la meilleure stratégie dépend du type d'acier et de l'exposition aux climats corrosifs de bord de mer.

Le deuxième levier vise à éviter le surdimensionnement du réseau pour faire face à des pics extrêmes de productions solaires et éoliennes qui ne sont atteints que quelques heures dans l'année. Le SDDR montre ainsi qu'en écrétant 0.3% de la production ENR annuelle, on évite 7 milliards d'euros d'investissements sur 15 ans dans les infrastructures lourdes de réseau. Afin de garantir une exploitation fiable du réseau, il faut pouvoir automatiser ces écrêtements de manière fiable et rapide. Dans cette optique, la R&D a développé le concept d'automate de zone (NAZA, Nouvel Automate de Zone Adaptatif) et prépare l'architecture de pilotage qui permettra aux opérateurs des centres d'exploitation du système électrique de superviser des centaines d'automates simultanément.

Les automates d'écrêtement des ENRs en exploitation concernent aussi les études à long terme.

La R&D sur l'architecture de pilotage doit permettre aux opérateurs de superviser des centaines d'automates. Ces solutions doivent aussi être prises en compte en amont dans les études d'évolution de la structure du réseau : l'ingénieur d'étude doit à ce titre pouvoir disposer des outils aptes à simuler le réseau futur avec automates et ainsi sécuriser le gain du premier ordre mis en avant dans le SDDR.

FONCTIONNEMENT D'UN SYSTÈME ÉLECTRIQUE À BASE D'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

L'horizon 2030 voit aussi le développement massif des productions et des consommations raccordées via de l'électronique de puissance. Il s'agit des chargeurs des ordinateurs portables, des chargeurs des véhicules électriques et surtout de leurs équivalents pour les panneaux solaires et les éoliennes. Ces objets ont un comportement électrique radicalement différent de celui des productions et des consommations historiques, comme par exemple les alternateurs des centrales, les moteurs des anciennes machines à laver et les résistances électriques des radiateurs.

Ces nouveaux comportements électriques affectent la stabilité en temps-réel du système électrique⁽¹⁾, qui est une condition de fonctionnement essentielle; c'est un socle sur lequel s'appuient toutes les fonctions de plus haut niveau comme le pilotage des flux ou l'équilibre offre-demande.

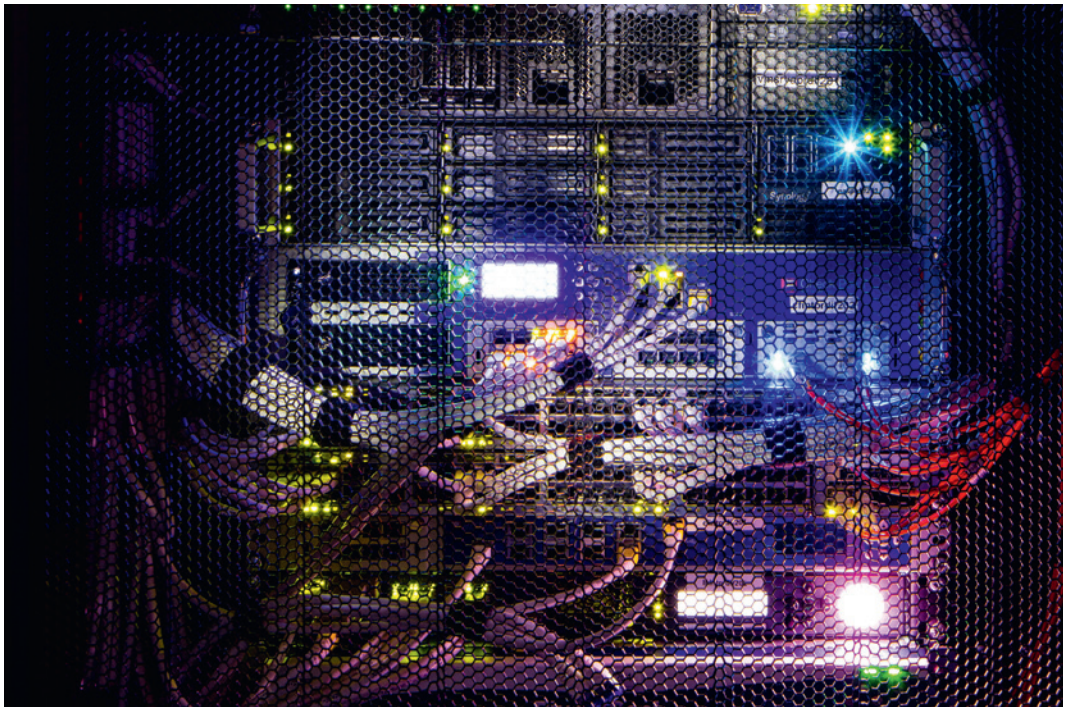
(1) Cela concerne la stabilité de la fréquence et de la tension, l'inertie, le synchronisme, etc.

Ainsi les pénétrations élevées d'électronique de puissance nécessitent des évolutions radicales des pratiques, outils et matériels² pour disposer en amont des nouvelles solutions capables de préserver demain, en temps réel, la stabilité, que ce soit en régime constant ou face à un aléa. La R&D de RTE a été précurseur dans ce domaine en mettant la problématique de l'électronique de puissance à l'agenda des universitaires, des industriels et des autres opérateurs de réseau, sachant que les systèmes électriques les plus petits (petites îles, Irlande, UK, Scandinavie) seront impactés avant la plaque européenne continentale.

L'enjeu pour RTE est d'être prêt à temps. Sans préparation, le risque est la survenue fréquente de défaillances techniques graves (effondrement partiel ou total du réseau), ou de devoir activer des mesures préventives coûteuses pour la collectivité, comme imposer le maintien de certaines centrales historiques.

En outre, bien que l'horizon de temps de cet enjeu soit 2030 et au-delà, il est nécessaire d'agir rapidement pour capter le potentiel apporté par les nouveaux leviers d'action diffus, et orienter le cas échéant les capacités constructives des nouveaux entrants afin qu'ils puissent fournir les services requis (voir exemple ci-dessous).

La participation des véhicules électriques à la stabilité du réseau est à préparer dès maintenant, sans quoi des millions de véhicules sortiront sans cette fonction, malgré des impacts potentiellement nuls sur les coûts de fabrication et sur le confort d'usage.



(2) Cela concerne les méthodes d'étude de la stabilité, les simulateurs numériques utilisés dans ces études, les protections (les disjoncteurs et automatismes associés), le plan de défense, le plan de reprise de service.

2.3 ANTICIPER 2040-2050 : LA NEUTRALITÉ CARBONE

Le Green Deal engage l'Europe vers la neutralité carbone, l'économie circulaire et la régénération de la biodiversité. Cela signifie une restructuration profonde de l'ensemble des secteurs économiques, en particulier le secteur énergétique, grand émetteur de gaz à effets de serre.

Le Green Deal répond à des menaces « existentielles ».

C'est le terme employé par la Commission Européenne pour donner la mesure de l'enjeu. Citons par exemple les conséquences du dérèglement climatique sur l'habitabilité de la planète : 1 à 3 milliards de personnes en climat hostile d'ici 2070, selon les scénarios d'action forte ou d'inaction.

Le défi est titanesque et le temps limité. En effet, le temps nécessaire pour restructurer les grandes infrastructures énergétiques, tant de production que de réseau, de même que le temps d'évolution de l'offre industrielle, imposent de prendre rapidement des orientations de politique énergétique et de stratégie industrielle. Et décider nécessite une vision prospective préalable. Quels mix énergétiques ? Quelles architectures de réseau possibles ? Quelles technologies pour cette infrastructure ? La R&D se mobilise pour contribuer à forger cette vision, avec les axes contributifs suivants, qui sont interdépendants :

— Prospective

La prospective vise à préfigurer les futurs systèmes énergétiques possibles, dans un contexte de transition profonde et donc d'incertitude sur les nouveaux équilibres à long terme, politiques, sociétaux, économiques et environnementaux. Il s'agit de bâtir des hypothèses sur le mix de production, sur les usages de l'énergie et sur les réseaux dans une vision cohérente et scénarisée. Les inducteurs de changement à étudier sont notamment : la restructuration des usages pour la neutralité carbone, les couplages énergétiques (voir l'exemple ci-contre), la multiplication des échelles de décisions (locales, nationales, européennes), l'environnement, les dynamiques sociétales, l'architecture du réseau à long terme du local à l'Europe, et la résilience à des perturbations nouvelles (ex : pandémie).

La biomasse est convoitée pour atteindre la neutralité carbone, pour des usages énergétiques (directs ou via carburants ou gaz) et non énergétiques (construction, alimentation, préservation de la biodiversité). La répartition de la biomasse sur ces usages conditionne fortement l'électrification de la mobilité.

— Développement de l'Éolien Off-Shore

Entre 2020 et 2030, les premiers parcs éoliens issus des appels d'offre émis entre 2010 et 2020 vont être mis en service. Ce sont des éoliennes posées en eaux peu profondes (100m au maximum) pour lesquelles les technologies ont été éprouvées sur les sites en mer Baltique. De nombreuses études d'impact sur la faune maritime ont été menées, certaines en partenariat avec l'Institut pour la Transition Énergétique (ITE) France Énergie Marine. L'augmentation du nombre de parcs à raccorder, ainsi que la puissance à exporter augmentant, a conduit à confier à RTE la mise en œuvre de plates-formes émergées de postes électriques de collecte et d'export de l'énergie vers le réseau terrestre. Ces nouveaux équipements sont des structures comportant un poste électrique Haute Tension en courant alternatif en bâtiment sur une structure fixe ancrée au sol.

Au-delà de 2030, les parcs d'éoliennes devraient s'éloigner plus encore de la côte, atteindre des profondeurs d'eau plus importantes (supérieures à 100m), tandis que la rareté des points d'atterrages praticables vont conduire à des besoins d'export de puissance atteignant 1 GW, puis 2 GW. Les problèmes nouveaux à résoudre sont de trois types : la structure porteuse doit alors être flottante avec un ancrage au fond et subir les contraintes de vent et de houle, les câbles Haute Tension (HT) et Très Haute Tension (THT) de collecte et d'export vont avoir une partie immergée « flottante » et subir des efforts dynamiques plus importants tout en offrant une plasticité aux courants, enfin la distance et la puissance à exporter vont rendre nécessaire le recours à la conversion Courant Alternatif (AC)/Courant Continu (DC) et la mise en œuvre de stations HVDC (High-Voltage Direct Current) sur la plate-forme flottante.

Le présent programme de recherche s'intéressera donc d'une part aux verrous technologiques des postes en mer flottants, d'autre part à la conception des câbles HT/THT dynamiques en AC, puis en DC, aux équipe-

ments d'électronique de puissance et enfin aux contraintes réciproques de la structure mécanique flottante et d'une station HVDC.

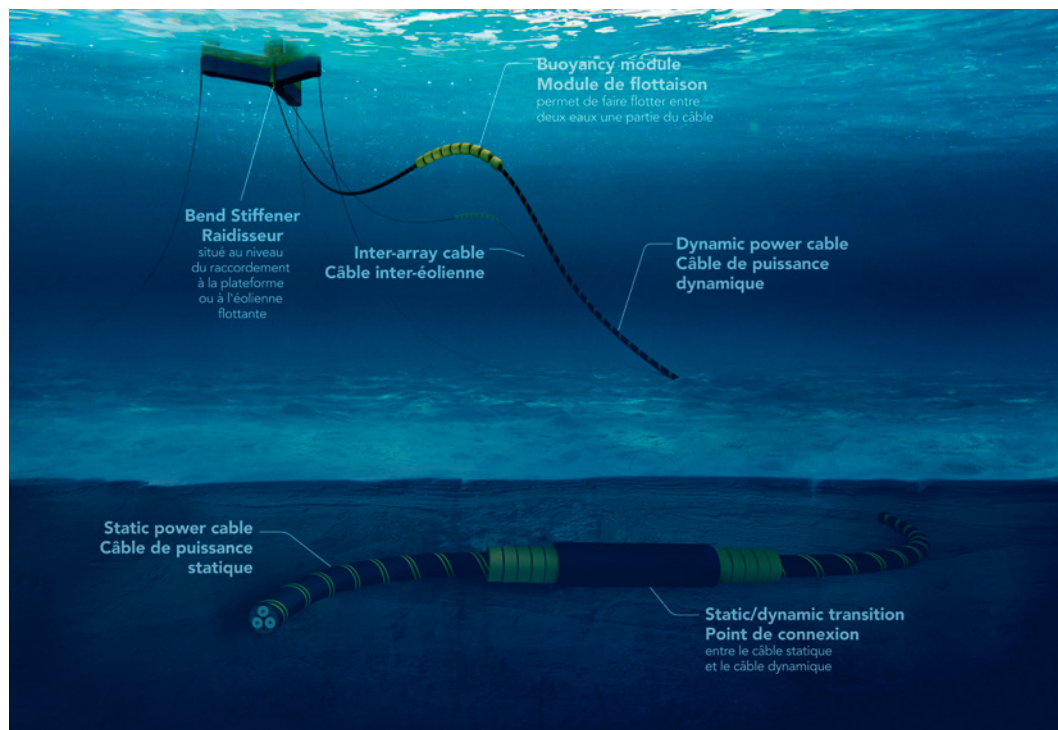


Figure : Éolienne flottante

— Future infrastructure éco-conçue

Le vieillissement du réseau et l'intégration des ENRs offrent l'opportunité de déployer une nouvelle génération d'infrastructures de réseau, embarquant des nouvelles solutions techniques cohérentes avec la vision prospective.

Nous aurons notamment besoin de solutions techniques pour la nouvelle frontière que sera le développement off-shore en eaux profondes.

Plus généralement, pour toutes les futures infrastructures, il faut anticiper l'évolution des réglementations environnementales que préfigure le Green Deal, en les prenant en compte dès la conception, dans le design même des matériels. Ainsi la R&D «éco-conçoit» la future infrastructure.

Le biomimétisme ouvre des voies d'éco-conception radicalement nouvelles, par exemple :

- **Se passer du béton dans les liaisons souterraines** en terrain sablonneux, en mobilisant les organismes vivants calcificateurs (solution BIOCALCIS).
- **Contenir le bio-fouling des câbles flottants**, c'est-à-dire leur envahissement par des végétaux indésirables, avec un revêtement de câble s'inspirant de la peau de requin ou en accueillant sélectivement les végétaux favorables à la flottaison.

La R&D, à travers de nombreux partenariats, cherche à identifier les verrous techniques, puis à les surmonter via des études de concept et des démonstrateurs, et *in fine* permettre l'émergence d'une offre industrielle répondant à nos besoins.



Figure: Plate-forme



Programmes de R&D



L'atteinte des six finalités présentées ci-dessus nécessite donc l'apport de compétences variées : par exemple, la « faisabilité d'un réseau au plus juste » repose à la fois sur des travaux sur l'implémentation d'automates dans les postes électriques, donc avec une dimension numérique au cœur des infrastructures, sur la capacité à modéliser ces dispositifs dans nos outils technico-économiques d'aides à la décision pour les investissements long terme ou encore sur la simulation fine de notre politique de gestion des actifs.

Autre illustration : la prospective relève à la fois de compétences pour élaborer des scénarios réalistes techniquement, à les amender en vertu d'apports des sciences humaines et sociales et enfin requiert des

outils capables de simuler au pas horaire le fonctionnement du système électrique dans sa dimension équilibre offre-demande.

On pourrait aussi citer l'éolien off-shore qui s'appuie sur des compétences matériel (plates-formes en mer, câbles dynamiques), biodiversité (préservation du milieu marin) ou encore stabilité du système (participation des éoliennes aux services système).

La Direction R&D a choisi d'organiser ces compétences via 6 programmes fonctionnels cohérents mentionnés ci-dessous en « pétales » ; au centre, un 7^e programme porte les compétences transverses qui irriguent l'ensemble des activités.



Ces programmes intègrent eux-mêmes chacun un certain nombre de feuilles de route thématiques.



3.1 PROGRAMME STABILITÉ DU SYSTÈME

— Contexte

Aujourd'hui, la dynamique du système électrique est principalement dictée par le comportement physique des alternateurs des centrales de production. Les différents phénomènes qui peuvent affecter sa stabilité, dont la constante de temps est comprise entre quelques microsecondes et quelques secondes, sont clairement identifiés et sont étudiés en s'appuyant sur des méthodes, des modèles et des outils définis sur la base d'une connaissance approfondie du fonctionnement du système.

Les transformations à venir du secteur de l'énergie, notamment le développement massif de productions et de consommations raccordées par de l'électronique de puissance, vont remettre en cause les fondements de la stabilité du système électrique. Le comportement de celui-ci ne sera plus dicté uniquement par des lois physiques universelles bien connues mais par des lois de commande issues de spécifications. Quels phénomènes devront être étudiés pour juger de la stabilité du système ? Quelles méthodes devront être employées ? Quelle modélisation du réseau et des éléments qui y sont connectés seront nécessaires ? Comment assurer la résilience du système vis-à-vis d'incidents de grande ampleur ?

Les outils de simulation devront également être adaptés : il est d'ores-et-déjà clair qu'ils devront permettre davantage de flexibilité et de transparence, afin de répondre aux besoins d'analyse de grands systèmes intégrant une grande diversité de sous-systèmes.

— Ambition

Le programme a pour ambition de fournir le cadre scientifique d'analyse, les méthodes et outils permettant aux équipes opérationnelles de continuer à assurer la stabilité du système électrique de façon durable dans le contexte de la transition énergétique, en travaillant sur deux axes :

- la définition de la stabilité dans ce nouveau contexte et les évolutions nécessaires pour continuer à identifier et maîtriser les risques associés, à assurer la résilience du système, dans le cadre de la feuille de route « Stabilité d'un système en forte mutation » ;
- le développement d'une nouvelle gamme d'outils de simulation qui permettra de continuer à réaliser des études réseau de qualité, porté par la feuille de route « Simulateurs électrotechniques du fonctionnement du système ».



3.1.1 STABILITÉ D'UN SYSTÈME EN FORTE MUTATION

— Contexte

Le raccordement massif d'équipements interfacés par de l'électronique de puissance va profondément modifier le comportement dynamique des systèmes électriques, rendant nécessaire de revisiter le concept de stabilité, de définir les nouveaux besoins à satisfaire pour maîtriser celle-ci et de repenser la manière dont sa résilience est assurée vis-à-vis d'événements de grande ampleur.

Ces besoins sont satisfaits :

- lors de la phase de développement du réseau, par les exigences techniques de raccordement, qui devront être mises à jour dans les 10 ans à venir pour anticiper l'accélération de la pénétration d'électronique de puissance prévue à l'horizon 2030 ;

- lors de l'exploitation du réseau, en identifiant au plus tôt les situations qui pourraient mettre en péril la stabilité du système et en activant des moyens permettant d'éviter ou de limiter les conséquences associées. Ces activités reposent sur des méthodes, des modèles et des outils qui devront être renouvelés.

— Ambition

Définir, surveiller et maîtriser la stabilité d'un système électrique avec une forte pénétration d'électronique de puissance, et assurer sa résilience.

— Objectifs

Conception du système futur et définition des exigences	Les définitions de stabilité doivent être élargies, en identifiant les nouveaux phénomènes susceptibles d'impacter la stabilité des systèmes dominés par de l'électronique de puissance. Des solutions techniques pour assurer la stabilité du réseau futur seront également étudiées, afin de les mettre à disposition de tous les acteurs et de les pousser vers une industrialisation au moindre coût pour la collectivité. Enfin, l'objectif final est l'adaptation des codes de réseau au système électrique de demain, qui nécessitera une évolution de leur formalisme : des gabarits temporels aux points de connexion comme ceux utilisés aujourd'hui seront insuffisants pour maîtriser la dynamique d'un système dominé par les lois de commande de l'électronique de puissance.
Surveillance de la stabilité	Historiquement, la stabilité a été gérée en temps réel à l'aide de consignes établies sur la base de simulations faites en amont ; celles-ci risquent de devenir insuffisantes du fait du changement de la dynamique du système et de l'intermittence des ENR qui rend les conditions d'exploitation de plus en plus incertaines. Il est donc nécessaire de travailler sur des approches plus proches du temps réel pour identifier les situations à risque. Les méthodes permettant de vérifier le respect des codes de réseaux devront par ailleurs être renouvelées, ce qui impliquera aussi un travail sur les mesures nécessaires et leur disponibilité.
Maîtrise de la stabilité : modèles et leviers	Lorsqu'un problème de stabilité est détecté, il faut disposer de leviers pour revenir à des conditions d'exploitation acceptables. Des recherches doivent être menées sur des méthodologies pour l'identification de ces nouveaux leviers. Ces méthodologies reposeront comme actuellement sur la simulation et seront donc tributaires de modèles. Des modèles adaptés aux nouveaux phénomènes à étudier doivent donc être développés et validés.
Résilience – Plans de défense et de reconstitution	Il s'agit ici de repenser les plans de défense et de reconstitution du réseau, qui visent à limiter les conséquences des incidents graves et à réduire le temps de récupération, pour tirer profit des nouvelles possibilités offertes par l'évolution du secteur de l'énergie, notamment des leviers diffus.

— Collaborations

Collaboration avec les GRTs (Gestionnaire de Réseau de Transport) européens et leur tissu académique pour les nouveaux modèles/méthodes/codes de réseau.

Établir un cadre de collaboration R&D avec ENEDIS, nécessaire pour des avancées significatives sur les plans de défense et de reconstitution tirant parti des leviers diffus.

La surveillance des oscillations

Le système électrique est soumis en permanence à des perturbations de plus ou moins grande ampleur (connexion de charges, ouverture de disjoncteurs, courts-circuits, ...) qui excitent des modes d'oscillations entre des éléments qui le composent, à la manière d'un pont qui bouge en fonction du trafic routier ou du vent.

Ces modes d'oscillations peuvent être très bien amortis (l'amplitude des oscillations décroît très rapidement) ou, à l'extrême inverse, instables (l'amplitude des oscillations croît). Un des axes de la feuille de route consiste à travailler à la mise au point d'outils permettant leur surveillance en temps-réel afin de prendre rapidement les mesures permettant de les résorber.

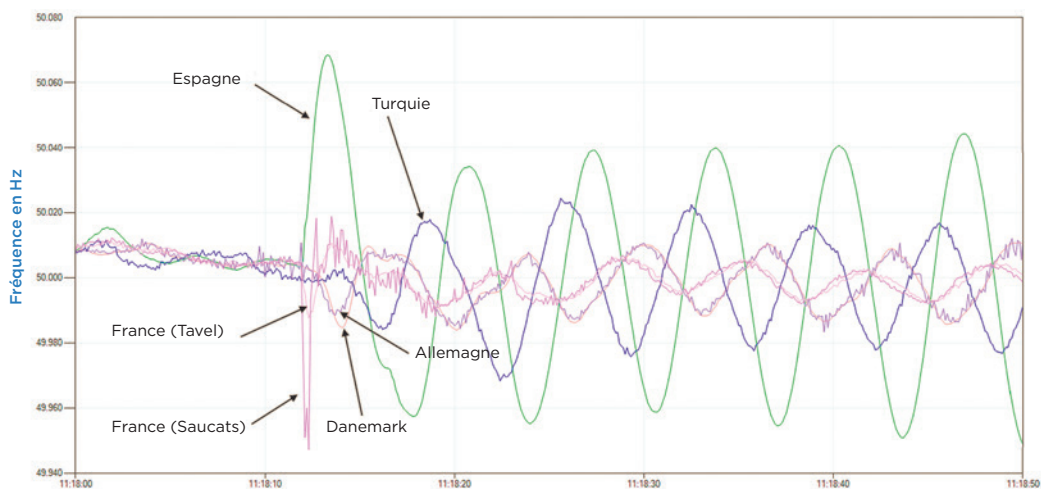
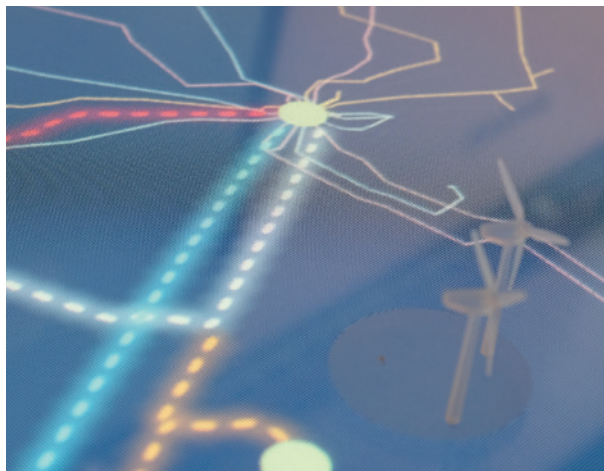


Figure : Oscillations sur le réseau européen le 1^{er} décembre 2016 – La fréquence en Turquie et en Espagne oscille en quasi opposition avec la fréquence au Danemark et en Allemagne (source : ENTSO-E)



3.1.2 SIMULATEURS ÉLECTROTECHNIQUES DU FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME

— Contexte

L'estimation de la stabilité du réseau repose sur la simulation. Or, les évolutions du système électrique vont rendre les simulateurs actuels de moins en moins adaptés :

- les simulations seront menées sur des réseaux de plus en plus grands, complexes et détaillés, au cœur de processus métier contraints par les temps d'exécution et de prises de décision : il faudra donc pouvoir concilier flexibilité, performance et qualité des outils de simulation ;

- les approches historiques utilisées dans les simulateurs actuels ne seront plus adaptées : les frontières existantes entre les différents phénomènes impactant la stabilité du système vont en effet évoluer ou disparaître du fait de la pénétration importante des dispositifs à base d'électronique de puissance, ou encore des différents niveaux de contrôle installés sur le système.

— Ambition

Développer une nouvelle gamme d'outils de simulation, évolués et adaptatifs, s'appuyant sur des briques de base open-source et génériques ; celle-ci permettra la réalisation d'études de réseau de qualité dans le contexte des transitions énergétique et numérique, caractérisées par des cycles d'innovation rapides et une grande diversité de nouveaux équipements contrôlables.

— Objectifs

Remplacement des outils de simulation pour la stabilité long terme et la stabilité transitoire	Le nouvel outil pour la stabilité long terme, c'est-à-dire l'étude des phénomènes dont la constante de temps varie de quelques secondes à quelques dizaines de secondes, a fait l'objet d'une expérimentation et sera déployé durant l'hiver 2021/2022 (stade « Implémentation »). Le concept du nouveau simulateur pour la stabilité transitoire a été validé : les prochaines étapes visent à un développement de l'ensemble des modèles nécessaires, puis une validation avant expérimentation et déploiement (stade « Industrialisation »).
Redéfinition des outils de simulation pour le calcul d'états d'équilibres et la gestion des courts-circuits	Une nouvelle approche de calcul d'état d'équilibre a été développée pour une prise en compte plus pertinente et plus naturelle des automates contrôlant le système et elle a été testée sur quelques cas : un prototype est disponible qui va maintenant être enrichi pour supporter tous les ouvrages existants et en cours d'études des réseaux RTE et européens. Par ailleurs, les performances vont faire l'objet d'un travail d'améliorations mélangeant recherche amont et amélioration industrielle (stade « Démonstration »). L'approche à retenir, pour les calculs de courants de court-circuit qui sont des paramètres importants de la gestion de nos infrastructures, est en cours de définition avec plusieurs pistes d'études en cours d'exploration (stade « Exploration »).
Prise en compte des nouveaux composants du système	Des actions de recherche doivent être menées pour bien prendre en compte les nouveaux composants du système. Un prototypage permettra ensuite de vérifier la pertinence des choix envisagés. Cette activité comprend par exemple les réflexions autour des besoins en simulation dans un système avec une forte pénétration d'électronique de puissance ou la bonne prise en compte de l'ensemble des moyens de contrôle insérés dans le système, notamment les automates (contrôleurs à temps discret).
Diffusion et collaboration open-source	RTE s'est engagé dans la direction de la diffusion de sa nouvelle gamme d'outils de simulation en les mettant à disposition en open-source et en y utilisant de nombreuses briques elles-mêmes open-source. Il s'agit ici de faire avancer les briques de base et d'animer une communauté autour des simulateurs.

— Collaborations

Approche open-source pour les simulateurs, et communauté associée, en collaboration avec la Linux Energy Foundation. Mise en commun entre GRTs (ou Universités européennes des fonctions partagées.

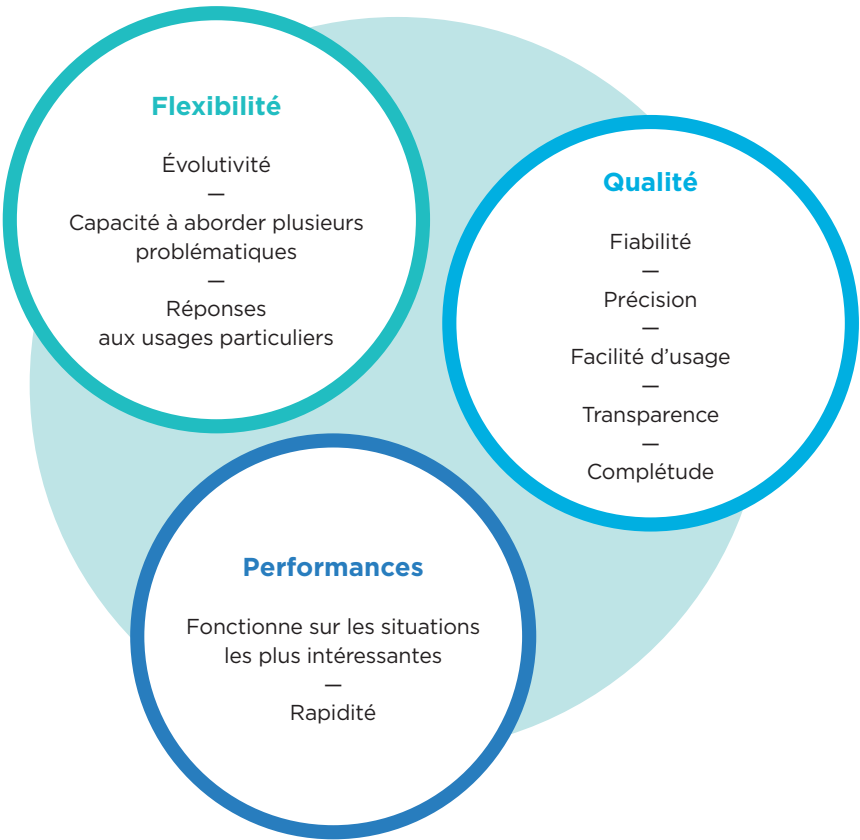


Figure : En complément des concepts historiques de qualité et de performance, le concept de flexibilité est au cœur de la démarche adoptée pour développer une nouvelle gamme de simulateurs, afin de permettre de simuler le comportement d'un système électrique qui va subir des transformations radicales et rapides.

3.2 PROGRAMME PILOTAGE DU SYSTÈME

— Contexte

Pour la période 2021-2024, le programme « Pilotage du système » fait suite au programme « Exploitation du Système » mené sur la période 2016-2020.

Le système électrique devient de plus en plus complexe, de moins en moins prévisible et son pilotage va devoir évoluer pour répondre à ces difficultés grandissantes.

Toujours plus de données avec une grande volatilité, de nombreuses incertitudes sur les grandeurs physiques du réseau comme la production d'énergie (notamment les énergies renouvelables) et la consommation, des échanges très importants et variables entre les différentes zones de marché, une fenêtre temporelle réduite pour laquelle RTE a le pilotage exclusif du système électrique, le déploiement massif d'électronique de puissance et d'automates, des pics d'activités de plus en plus nombreux... voici quelques éléments de ce nouveau contexte qu'il va falloir appréhender et auquel nous devons fournir de nouvelles réponses.

— Ambition

Pour faire face à cette situation, RTE se doit de mettre à disposition de nouvelles solutions pour les opérateurs des salles H24 Équilibre Offre Demande (EOD)-Flux pour gérer cette complexité croissante tout en maîtrisant les coûts de l'exploitation et en maintenant le domaine de risque et la sécurité d'alimentation dans un domaine acceptable.

Nous allons à ce titre développer des assistants destinés à aider les opérateurs à focaliser leur attention sur des tâches prioritaires à forte valeur ajoutée. Les assistants devront simplifier la prise en compte de la multitude d'informations en les synthétisant, anticiper les situations difficiles, automatiser les tâches de moindre valeur, capitaliser les bonnes pratiques...

Ce but ne pourra être atteint qu'en renforçant l'anticipation et l'appréhension des principaux facteurs impactant la conduite du réseau (variation de consommation, production, topologie, échanges commerciaux...) afin d'aider les opérateurs à trouver le chemin d'exploitation le plus adéquat vis-à-vis des contraintes physiques du réseau tout en intégrant les systèmes automatiques qui géreront une partie des incertitudes et des aléas.

Dans cette optique, le programme « Pilotage du Système (PILS) » axera ses travaux de recherches et développements sur deux thématiques principales, la première visant à imaginer, tester et développer les assistants des opérateurs dans les Salles H24 EOD-Flux alliant des problématiques EOD et contraintes réseaux, la deuxième consistant à améliorer les prévisions court terme (consommation, EnR...) en intégrant une dimension probabiliste (intervalles de confiance) et une granularité spatio-temporelle plus fine pour mieux guider les opérateurs.



Figure : Le Centre National de l'Exploitation du Système (CNES) est un des principaux acteurs du pilotage du réseau électrique et de la gestion de l'équilibre-Offre-Demande.

3.2.1 FLUX, ASSISTANT SALLES H24

— Contexte

Le système électrique connaît en ce moment et depuis quelques années de profondes mutations, en particulier en raison du déploiement des énergies renouvelables, ainsi que de la mise en place généralisée d'automates.

Ces mutations rendent l'exploitation du système plus complexe qu'auparavant et ont alimenté divers axes de recherche :

- mise en place d'une doctrine de risque probabiliste,
- élaboration d'une vision prévisionnelle différente de l'approche actuelle basée sur la génération de la situation la plus probable via des méthodes de calcul plus sophistiquées,

- interactions avec et entre les opérateurs, dans un contexte où les événements sont probabilisés et où la dimension temporelle est importante,
- simplification de l'environnement de travail et proposition d'une meilleure ergonomie,
- exploration des possibilités ouvertes par les avancées récentes en IA pour l'exploitation du système.

— Ambition

S'inspirant de ces travaux, l'objet de la démarche à travers cette feuille de route sera de définir et développer un ensemble d'outils et méthodes pour aider les opérateurs, qui font des études de réseaux et conduisent le système électrique du J-1³ au temps réel, à prendre des décisions en anticipation grâce à un ensemble de « smart assistants ».

— Objectifs

Meilleure anticipation des situations réseaux	Permettre à l'opérateur de mieux anticiper les cas potentiellement problématiques pour l'exploitation du réseau en développant une meilleure modélisation des incertitudes sur les injections (consommation, production, flux aux frontières, automates, flexibilité et contrôles automatiques distribués) et des défaillances d'ouvrages à court terme (< 48h).
Amélioration de la vision prévisionnelle	Déterminer le meilleur chemin de l'exploitation en cherchant à savoir si une solution existe pour les contraintes détectées en anticipation, le cas échéant de la proposer et de laisser le choix à l'opérateur de mettre en place la solution ou non.
Renforcement du lien bidirectionnel entre l'humain et la machine	De manière à restituer les synthèses d'information les plus pertinentes au moment opportun et au bon destinataire, prendre en compte le choix des opérations sur les actions proposées et faciliter les échanges et la coordination entre les acteurs des différentes salles H24 (EOD-Flux, Matériels et Télécom).

(3) La veille pour le lendemain : 24 heures en avance plutôt en mode glissant.

— Collaborations

Parmi les principales collaborations de cette feuille de route, nous pouvons mettre en exergue celle avec l'Université d'Aix-la-Chapelle pour développer des méthodes d'évaluation robustes pour les prévisions de

l'état du réseau, dans le sillage des travaux du projet Européen iTesla, et celle avec Black Light Analytics pour améliorer l'évaluation et l'anticipation des contraintes dynamiques du système.

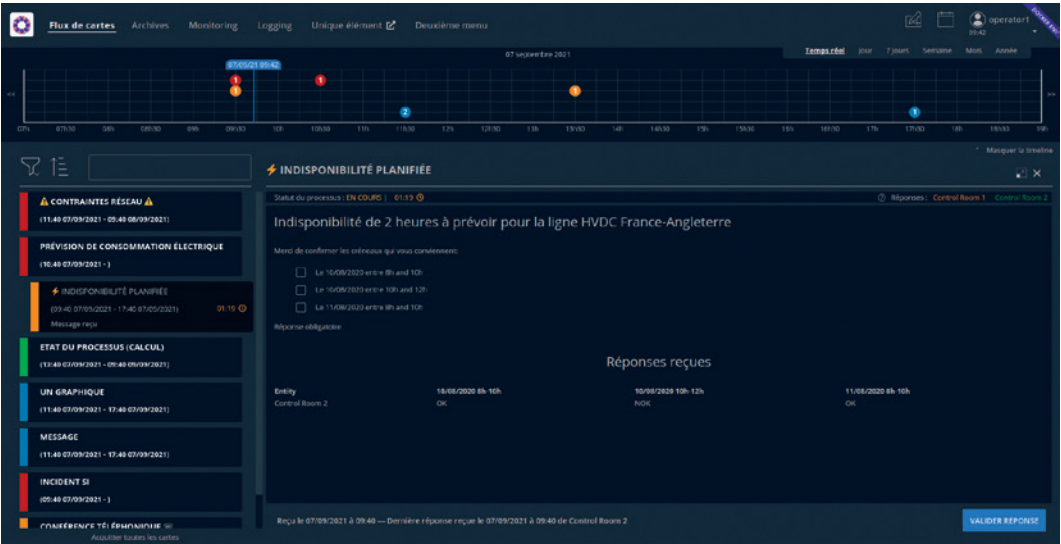


Figure : L'outil Operator Fabric fait converger les flux d'informations de différents outils dans un écran unique pour présenter à l'opérateur les plus pertinentes au moment le plus opportun.



3.2.2 EOD, ASSISTANT SALLES H24

— Contexte

La gestion de l'Equilibre-Offre-Demande (EOD) et ses interactions avec le réseau connaissent actuellement une phase d'évolutions rapides, profondes et radicales. La mise en place des codes de réseaux européens viennent changer les principes de cet équilibrage et complexifier la gestion proactive et coordonnée des marges: multiplication des guichets d'ajustement, réduction de la fenêtre opérationnelle, de plus en plus d'interactions possibles avec les congestions de réseau...

Ces mutations rendent la gestion de l'EOD plus complexe qu'auparavant et alimenteront ces divers axes de recherche:

- Définir les évolutions des méthodes et d'outils actuels nécessaires pour accompagner l'arrivée des plates-formes européennes, des nouvelles contraintes d'échanges aux frontières et l'insertion

massive d'énergies renouvelables sur le marché tout en maîtrisant leurs conséquences sur les contraintes réseau,

- Proposer des nouveaux outils (smart assistants) pour accompagner les transformations en cours de l'EOD (dimensionnement des réserves, des marges et services systèmes diffus) afin de garantir un fonctionnement optimal malgré une réduction de la fenêtre opérationnelle due à l'augmentation de la fréquence des guichets d'ajustement,
- Faire converger les alertes des différents processus/ outils de l'EOD vers une interface simplifiée et ergonomique pour accélérer leur prise en compte.

— Ambition

S'inspirant de ces travaux, l'objet de la démarche au travers de cette feuille de route sera de définir et développer un ensemble d'outils et de méthodes pour aider les opérateurs qui font l'équilibrage du réseau proche du temps réel à prendre les meilleures décisions dans une fenêtre opérationnelle réduite grâce à un ensemble de « smart assistants ».

— Objectifs

Impact des plateformes européennes sur le réseau	Quantifier l'impact sur le réseau des activations des plates-formes européennes d'EOD dans différents scénarios.
Développement des smart assistants pour l'EOD	Proposer des nouveaux outils (smart assistants) ou méthodes pour accompagner les transformations en cours de l'EOD (dimensionnement des réserves, des marges et services systèmes diffus) afin de garantir un fonctionnement optimal malgré une réduction de la fenêtre opérationnelle due à l'augmentation de la fréquence des guichets.
Interaction opérateur / Smart assistant	Faciliter l'interaction entre les outils/assistants et les opérateurs de l'EOD via une interface unifiée et ergonomique.

— Collaborations

Dans le cadre du projet européen OSMOSE, RTE participe au développement d'un démonstrateur d'échanges d'énergie transfrontaliers très proches du temps réel entre l'Italie et Slovénie prenant en compte les contraintes réseau. Ce démonstrateur est l'occasion d'explorer les interactions croissantes entre

l'EOD et le réseau, en collaboration étroite avec d'autres Gestionnaires de Réseaux de Transport européens (TERNA et ELES), des producteurs (HSE, HDE, ENEL) et des fournisseurs de solutions informatiques (EKC, Engineering).

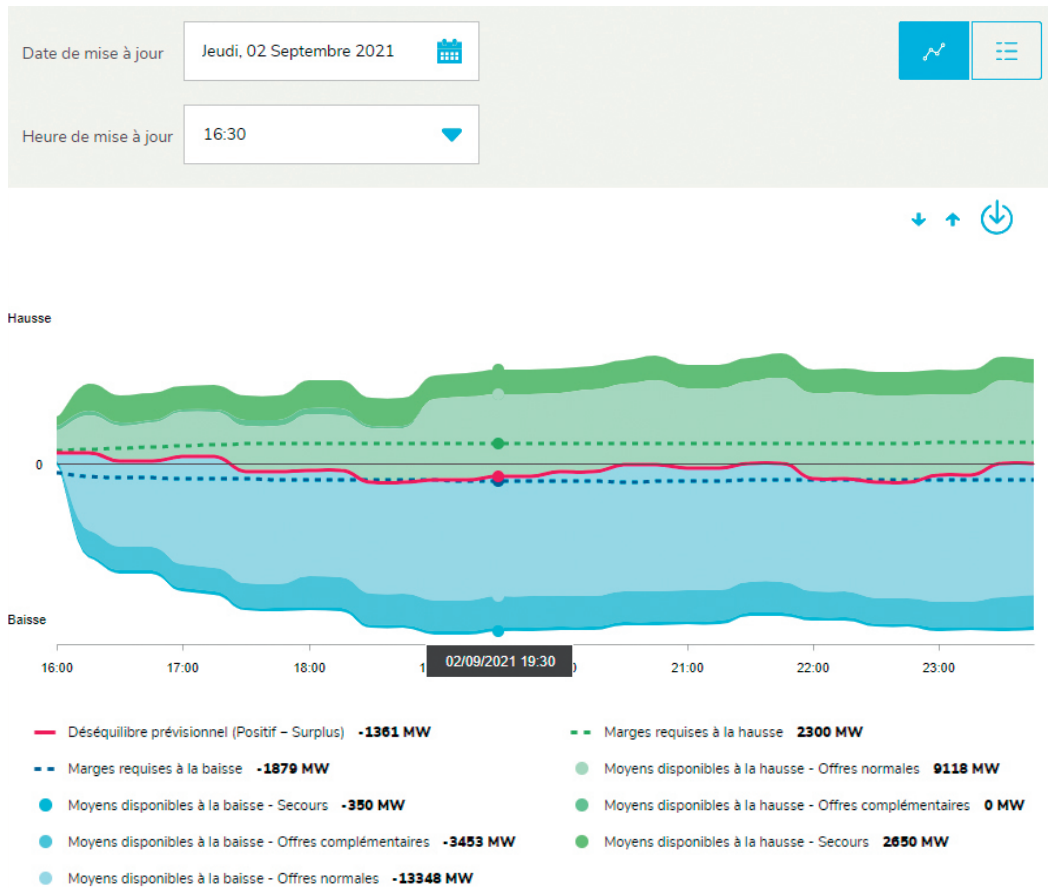


Figure: Pour assurer l'équilibre offre-demande malgré les aléas qui peuvent le perturber, RTE s'assure de la disponibilité de marges de puissance sur des moyens pilotables à travers l'outil MAUI en calculant automatiquement, toutes les 30 minutes, 24h/24, les marges requises et disponibles du système électrique français, pour chaque instant, à la hausse comme à la baisse.

3.2.3 PRÉVISIONS COURT TERME

— Contexte

La forte croissance des énergies renouvelables (EnR), productions intermittentes, accroît les besoins de contrôle du réseau. En effet, les futurs automates de zone qui permettront à RTE de gérer le réseau de manière plus fine devront disposer de la vision prévisionnelle locale la plus pertinente, précise et la plus à jour possible. De manière analogue, les évolutions liées à l'équilibrage-offre-demande (comme par exemple le passage de 24 à 96 guichets par jour, l'augmentation de la granularité temporelle des programmes des acteurs (pas à 15 min voire 5 min...)) vont aussi largement impacter les besoins en données prévisionnelles.

— Ambition

En améliorant la qualité des prévisions court terme des énergies renouvelables et de la consommation au plus proche du temps réel, via la mise en œuvre de méthodes de machine learning à l'état de l'art, tout en explorant la possibilité d'utiliser de nouvelles données (produits météorologiques, mesures électriques, prix de marché...), RTE pourra bénéficier de prévisions de meilleure qualité en diminuant les marges prises et en restant dans les limites d'une exploitation sécurisée du système.

En effet, les outils des prévisionnistes sont réactualisés de manière automatique, plus fréquemment, pour tirer profit de l'ensemble des données disponibles en temps réel et fournir des prévisions à des mailles temporelles plus fines qu'actuellement. Enfin, la refonte de certains processus de gestion préventive du réseau nécessitera la fourniture de prévisions probabilistes fiables (intervalles de confiance) s'adaptant, à tout instant, aux incertitudes des situations envisagées.



Figure : Les prévisions de consommation et de production des énergies renouvelables sont une activité clé pour RTE

— Objectifs

Amélioration des prévisions de consommation	Développer des modèles de prévision de consommation locale pour une meilleure granularité de la donnée en qualifiant les incertitudes et leurs corrélations spatio-temporelles.
Amélioration des prévisions d'énergies renouvelables	Améliorer le suivi des parcs EnR et notamment l'observabilité de la filière photovoltaïque via l'utilisation en temps réel de l'imagerie satellite pour une meilleure robustesse des modèles de prévision en anticipant les erreurs de prévisions météorologiques et la détection des indisponibilités.
Développement des méthodes probabilistes	Sur le plan plus méthodologique: généralisation et évolution des modèles de prévisions probabilistes.

— Collaborations

Parmi les principales collaborations de cette feuille de route, nous pouvons mettre en exergue d'une part celle sur le développement d'un code open-source avec Alliander (Gestionnaire de réseau de distribution d'électricité Hollandais) permettant l'apprentissage, le déploiement opérationnel et le monitoring de

modèles de prévision (consommation, production, injection/soutirage,...) et, d'autre part, celle avec Armines OIE pour l'amélioration de l'observabilité et de la prévisibilité de la production de la filière photovoltaïque via la valorisation de l'imagerie satellite ou encore l'utilisation de modèles «physiques».

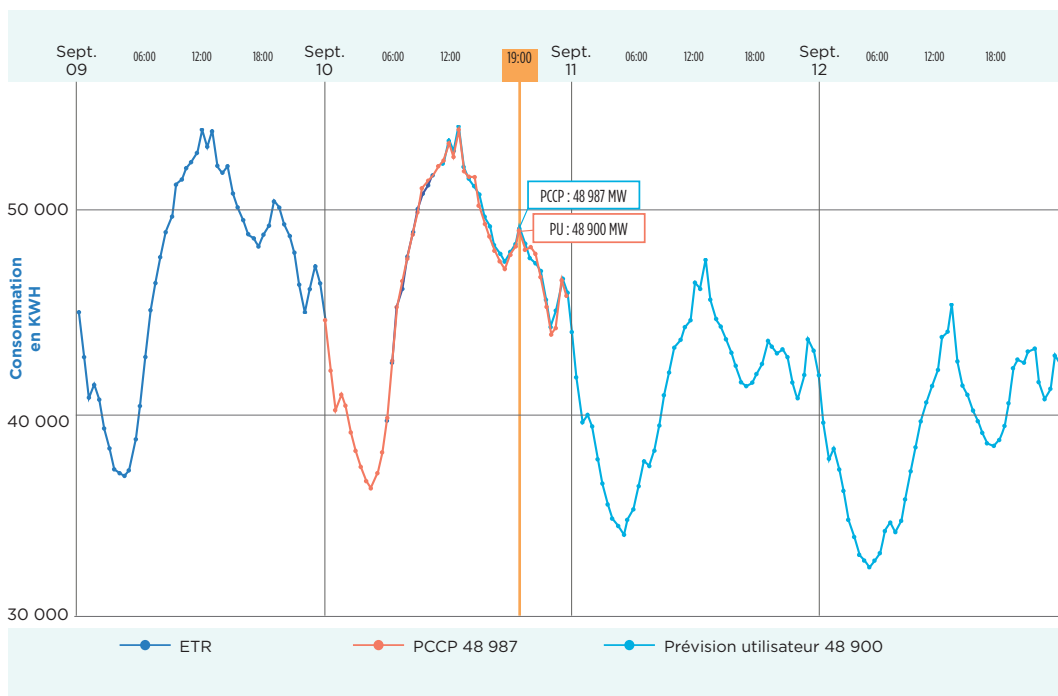


Figure : Pour anticiper d'éventuels déséquilibres entre l'offre et la demande, le modèle POPCORN utilise des prévisions météorologiques pour prévoir la consommation électrique française grâce à des méthodes de machine learning (ETR = Estimation Temps Réel de consommation, PCCP = Prévisions de Consommation à conditions météorologiques Prévues, PU = Prévisions utilisateur)



3.3 PROGRAMME GESTION DES ACTIFS

— Contexte

Depuis maintenant une dizaine d'années, la problématique de la gestion des actifs émerge dans les réseaux européens. Le réseau français, dont la majeure partie fut construite par grandes vagues après la seconde guerre mondiale puis lors du programme nucléaire, souffre d'une dette technique croissante : avec la tendance actuelle, son âge moyen augmente lentement mais inexorablement malgré des investissements importants. Comme l'indique le Schéma Décennal de Développement du Réseau (SDDR) publié en 2019, il est temps d'investir dans « le réseau du quotidien ». Des vagues de renouvellement se dressent devant nous, difficiles à franchir pour des raisons à la fois techniques, logistiques et économiques.

Défi supplémentaire, les actifs du réseau de transport sont des investissements de long terme (plusieurs décennies) alors que la transition énergétique en cours multiplie les incertitudes à des échéances rapprochées. Cela concerne aussi bien la structure du mix de production que l'évolution de la consommation. En conséquence les stratégies de gestion des actifs et leur mise en œuvre doivent être robustes à des futurs potentiellement très différents.

Dans le même temps, les possibilités offertes par les techniques numériques et la mise en place des salles « H24 » de supervision des matériels offrent des pers-

pectives nouvelles pour la recherche d'un optimum global entre exploitation et maintenance d'une part, et entre maintenance, renouvellement et développement d'autre part, tirant ainsi parti du caractère de « GRT complet » de RTE.

— Ambition

Seule une transformation des pratiques et le passage à une gestion des actifs fondée sur la connaissance de l'endommagement et l'estimation des risques permettront à RTE de relever ces défis. Le programme « Gestion des Actifs » vise à doter RTE de méthodes et d'outils innovants pour :

- Connaître l'état des actifs par la surveillance, l'inspection et le diagnostic, et le prédire grâce à la modélisation et la simulation. Notamment l'automatisation de l'inspection peut en améliorer beaucoup les performances.
- Doter RTE d'une chaîne cohérente d'outils d'aide à la décision, de la stratégie de gestion des actifs à la planification des opérations, avec l'objectif du meilleur compromis entre OPEX et CAPEX, optimum technico-économique et capacité à faire.
- Rechercher un optimum global maintenance-exploitation dans les salles H24, fondé notamment sur une gestion améliorée des données, considérées comme un actif.

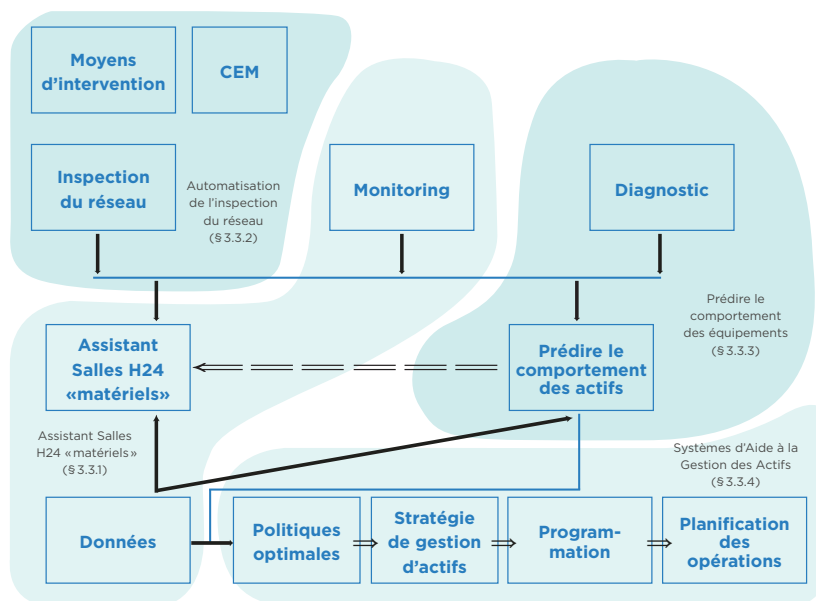


Figure: Plan général du programme Gestion des Actifs



3.3.1 ASSISTANT SALLES H24 MATÉRIELS

— Contexte

Dans le cadre de son projet d'entreprise, RTE a décidé la mise en place à partir de 2024 de salles centralisées «H24» au centre d'un écosystème pour la supervision des ouvrages et l'optimisation rapprochée de la maintenance. Le projet «d'accélération du monitoring», issu de travaux antérieurs de la R&D, y fera converger des informations supplémentaires de surveillance des ouvrages, rendant possible la maintenance prédictive d'une part croissante des matériels. Les futures salles H24 «matériels» portent plusieurs enjeux :

- Tirer parti de l'intégration de RTE et de la coordination entre métiers, entre zones et entre niveaux pour assurer les arbitrages et la sécurité dans un souci d'optimum global. Un des principaux défis consistera à articuler des référentiels métier historiques construits autour de problématiques différentes.
- Conserver dans la durée la maîtrise de choix de maintenance pertinents et auditable fondés sur une bonne connaissance de l'état des actifs et une capacité à anticiper les conséquences de ces choix. Outre des modèles de comportement fiables des actifs, un progrès significatif de la complétude et de la justesse des données est indispensable, qu'elles soient patrimoniales, environnementales ou dynamiques.
- Rapprocher du terrain ces salles centralisées et couvrant une zone étendue : «matérialisation» des équipements dans les salles H24 et appui aux équipes d'intervention par l'expertise centralisée. Le recours aux jumeaux numériques pourra représenter un levier déterminant.

— Ambition

Proposer un ensemble de méthodes et d'outils novateurs permettant de développer tout le potentiel d'optimisation de la maintenance ouvert par la mise en place des nouvelles salles H24 de supervision des matériels. Cela appelle, notamment en matière de gestion des données, des progrès qui seront profitables bien au-delà de la supervision des matériels.

Les jumeaux numériques: un outil essentiel pour visualiser, comprendre, prédire, voire agir.

Un «jumeau» est un modèle numérique de la réalité. Il peut être :

- **statique** (comme la représentation en 3D des appareils),
- **dynamique** (comme un modèle d'état de l'appareil mis à jour par des mesures de terrain en temps réel),
- **prédictif** (c'est-à-dire permettant une simulation du comportement face à diverses sollicitations),
- ou enfin **actif**, c'est-à-dire capable d'intervenir sur le process réel.

De même il peut représenter un seul appareil (un transformateur par exemple) ou l'ensemble d'une entreprise.

Dans le cas des salles H24, l'ensemble des fonctions des jumeaux numériques seront explorées, en se concentrant sur la représentation des appareils.



— Objectifs

Supervision avancée	En articulant la formalisation des besoins en matière d'état de santé des équipements avec une veille active sur l'état des connaissances sur un ensemble de matériels prioritaires, l'objectif est de proposer des fonctions avancées de maintenance au moment du déploiement des salles H24. Au-delà des états de santé, on travaillera sur l'ergonomie des systèmes de décision par un appel aux sciences cognitives. En tâche de fond, la R&D continuera d'investiguer en fonction des besoins sur des systèmes innovants de monitoring.
Valoriser l'actif «données»	En considérant la donnée comme un actif, objet d'une maintenance et de «réhabilitations», il s'agit de développer des méthodes innovantes de surveillance automatique de la qualité des données, comme un «estimateur d'état» tirant parti de la redondance des données disponibles. L'autre champ important est l'articulation des référentiels de données, qui constitue un enjeu historique de RTE. Une démarche par ontologies est une voie prometteuse. L'ensemble se concrétisera par un «concept car» de jumeau numérique inter-métiers articulant un nombre limité de modèles de données normalisés.
Synergie inter-salles H24	Cette synergie se décline en deux axes de travail : • La recherche d'un optimum global entre enjeux réseau (qui conduisent à solliciter le matériel aux limites) et matériels (risques de défaillance), sur des cas d'usages comme les tensions hautes ou les fonctions avancées de gestion des consignations sur la base d'une vision globale du risque. • L'extension aux salles de supervision des matériels des concepts avancés développés pour les salles de flux, comme «l'hypervision».

— Collaboration

Université de Genève (exploration des ontologies pour l'articulation des standards de données).



3.3.2 AUTOMATISATION DE L'INSPECTION DU RÉSEAU ET MOYENS D'INTERVENTIONS

— Contexte

RTE procède à une inspection régulière du réseau de transport, 100 000 km de lignes aériennes (270 000 supports), 6 000 km de liaisons souterraines et 2 700 postes électriques. Il s'agit de contrôler l'état des équipements et de leur environnement : corrosion, état de la peinture, distance de la végétation, points chauds, brins coupés, ... autant de désordres qu'il est impossible de surveiller à distance. À l'heure actuelle, les inspections ont lieu pour l'essentiel à l'œil nu, depuis un hélicoptère, ou depuis le sol, voire en escaladant les supports ou par « l'œil déporté » d'un drone.

Depuis plusieurs années, RTE explore l'opportunité d'une automatisation de l'inspection des liaisons aériennes, remplaçant la vision et la mémoire humaines par des capteurs et des algorithmes d'interprétation et de comparaison. Les capacités de ces derniers sont bien supérieures, sur un spectre allant de l'ultraviolet à l'infrarouge et au laser, avec une résolution centimétrique. De plus cela permettrait d'alimenter massivement le système d'information en données structurées de qualité qui lui font aujourd'hui défaut. L'automatisation de l'inspection est par ailleurs étroitement associée au passage de l'hélicoptère au drone à long rayon d'action.



Figure : Simulation des risques aéronautiques sur une inspection de ligne

Plusieurs obstacles doivent être levés pour envisager une utilisation industrielle :

- Passer de composants dont la faisabilité est maintenant acquise (véhicule –voir encadré ci-dessous–, capteurs, algorithmes) à un système intégré opérationnel, couplé au système d'information, utilisable dans un domaine de fonctionnement suffisant (conditions météorologiques, environnement, ...) pour une utilisation industrielle ;
- Satisfaire une réglementation sur les drones à long rayon d'action à la fois exigeante et en cours d'élaboration (voir encadré ci-contre).

Défis réglementaires et solutions techniques.

L'inspection automatique de liaisons aériennes de plusieurs dizaines de kilomètres suppose l'usage de drones dits « de longue élévation », volant sans pilote sur de grandes distances. La réglementation dans ce domaine nouveau (hors usages militaires) est en cours d'élaboration : il s'agit d'aéronefs sans passagers mais risquant de tomber au sol. RTE, fort de l'expérience aéronautique de son Service des Travaux Hélicoptés, participe à ces travaux auprès de la Direction Générale de l'Aviation Civile. De façon concomitante, il faut étudier les moyens d'atteindre les exigences de sécurité, de même que les éléments de preuve que ceux-ci sont suffisants, comme la simulation.

— Ambition

Proposer une solution d'inspection automatique du réseau aérien viable sur les plans économique, industriel, et réglementaire. Explorer les créations supplémentaires de valeur de cette inspection et ses extensions possibles (postes électriques, autres moyens d'inspection et d'intervention, notamment dans le domaine des travaux sous tension (TST).



Figure : Test d'un robot d'inspection du réseau

— Objectifs

Inspection des liaisons aériennes	Atteindre un niveau d'exploitabilité et de sécurité suffisant pour lancer un projet industriel d'inspection automatique à fonctions identiques. Développer les nouveaux services (inspection par comparaison, détection d'autres défauts, mise à jour automatique des données). L'inspection par comparaison, qui consiste à mesurer l'évolution d'un défaut ou de la végétation entre deux inspections, ouvre la voie à la maintenance prédictive.
Inspection des postes électriques	Développer un premier prototype d'inspection automatique, notamment en conditions difficiles (stations de conversion pour le courant continu à très haute tension, etc.).
Moyens d'intervention	Développer des systèmes permettant d'améliorer les conditions de travail et le domaine d'application des travaux sous tension.

— Collaborations

CEA, CNIM Airspace, ONERA.

Pour en savoir plus sur les Diridrones : [Essais du Diridrone, octobre 2020](#)



Figure : Prototype de Diridrone lors d'essais en conditions réelles en 2020
Longueur: 14,5m Largeur: 4,5m Masse: 150 kg Charge utile: 10 kg

3.3.3 PRÉDIRE LE COMPORTEMENT DES ÉQUIPEMENTS

— Contexte

Pour surmonter les vagues de renouvellement des actifs qui approchent, il est nécessaire de passer d'une politique fondée sur un âge de remplacement unique à une politique fondée sur l'endommagement réel des actifs, leur probabilité individuelle de défaillance et les conséquences associées. Cet endommagement, qui dépend de la vie de l'actif, de son environnement, de son régime d'exploitation, de sa maintenance, doit être connu et surtout prédit avec fiabilité. C'est l'objet de cette feuille de route.

Les verrous techniques sont nombreux et obtenir des avancées significatives demande un travail de longue haleine. En effet :

- Les phénomènes à l'œuvre sont divers et potentiellement interactifs. Outre la complexité des phénomènes physiques à représenter, les moyens de calcul pour les simuler peuvent être conséquents.
- La reconstitution des « conditions de vie » de l'actif sur plusieurs décennies, nécessaire à l'évaluation de l'endommagement cumulé, est loin d'être aisée (historique des vents, des transits dans les conducteurs, de la corrosivité du milieu local, ...).

- Les ressources expérimentales nécessaires à la validation des prédictions (essais de laboratoire, prélèvements sur le réseau) sont rares et onéreuses.

Jusqu'à présent, dans la très grande variété des actifs du réseau, la priorité en matière de R&D a porté sur les conducteurs, éléments principaux du transport d'électricité, dont l'endommagement interne aux causes potentielles multiples n'est ni réparable ni décelable à l'œil nu.

— Ambition

En combinant des méthodes expérimentales, de modélisation multiphysique et d'analyse statistique, fournir des outils de prédiction du comportement des actifs critiques ou complexes. Doter RTE des moyens d'essais et de diagnostic, qu'ils soient numériques ou physiques, nécessaires à l'exercice de ses missions. Bien avancée pour les conducteurs aériens, cette ambition a vocation à être étendue aux autres composants du réseau.

— Objectifs

Conducteurs aériens et lignes aériennes	Faire aboutir les travaux de prédiction de l'endommagement des conducteurs et à terme, des supports et des fondations : • en étendant progressivement le domaine d'application : diversité des phénomènes d'endommagement, des types de conducteurs, des accessoires, des configurations (faisceaux multiples), etc. • en parvenant à une capacité de prédiction suffisamment vérifiée et d'un coût de calcul acceptable pour caler les politiques de gestion d'actifs. En parallèle, proposer un système de diagnostic interne valable pour tous types de conducteurs et d'endommagement.
Postes électriques	Étendre la connaissance du comportement par des modélisations multiphysiques à un ensemble de composants critiques et complexes : disjoncteurs, matériels bobinés dont les transformateurs, câbles basse tension, auxiliaires, ...
Enseignement et partage ⁴	Publier un ouvrage de référence résumant les travaux sur les conducteurs. Capitaliser autour de l'écosystème créé par les recherches précédentes pour créer une chaire de physique sur les lignes aériennes impliquant plusieurs laboratoires.

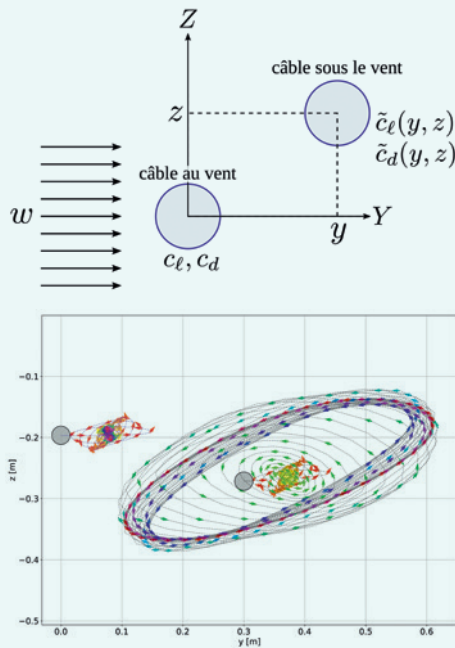
(4) La publication dans des revues scientifiques de référence, outre l'aspect positif du partage, permet d'asseoir les futures décisions de RTE sur des travaux scientifiquement validés. C'est donc, là où c'est possible, un objectif important.

Vidéos pour en savoir plus sur le projet OLLA⁵: le [projet OLLA](#), the [OLLA project](#). Sur le diagnostic des conducteurs aériens: [banc d'essais des systèmes de diagnostic](#), [test bench for diagnostic systems](#).

— Collaborations

École Normale Supérieure Paris Saclay, CEA, Université de Technologie de Compiègne, LETSCAN, INERIS.

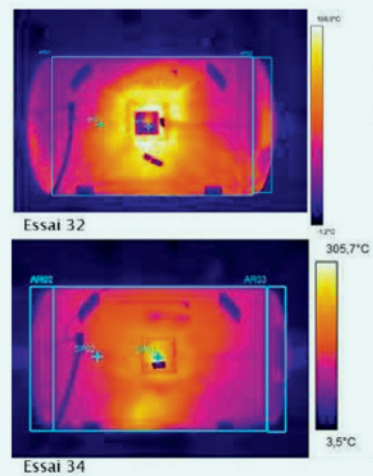
Vieillesse des conducteurs en faisceau multiple



Simulation des oscillations sous portée dans le cas d'un conducteur en faisceau. On voit clairement que celles-ci sont provoquées au niveau du câble «sous vent» par la trainée du câble «au vent». Reste à évaluer la dynamique d'endommagement par fatigue qui en résulte et en déduire un endommagement cumulé en fonction du régime de vent. (Eurobios / projet OLLA)

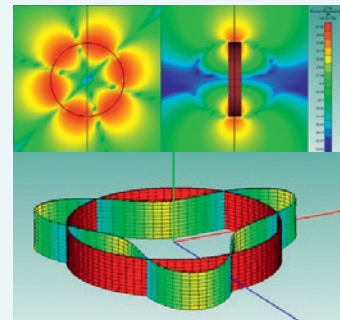
Liaisons souterraines

Simulation par des moyens pyrotechniques d'un défaut électrique dans une gaine souterraine pour en reproduire les effets thermiques et mécaniques. (cliché INERIS)



Comportement des matériels bobinés

Modélisation multiphysique (électro-vibro-acoustique) d'une bobine d'induction. Ce modèle a permis la conception de bobines moins bruyantes (brevet UTC - RTE).



(5) Overhead Lines Lifespan Assessment



3.3.4 SYSTÈMES D'AIDE À LA GESTION DES ACTIFS

— Contexte

Le Schéma Décennal de Développement du Réseau (SDDR) a montré la nécessité d'investir sur le « réseau du quotidien » dont la dette technique a tendance à augmenter. Réaliser l'accumulation d'opérations que cela implique pose diverses difficultés, qui ne seront surmontées que par une transformation des pratiques (cf. illustration ci-dessous) :

- Une augmentation substantielle des moyens consacrés à la gestion des actifs se devra d'être fondée sur une analyse de risque auditable et sur la démonstration de la capacité à faire. La stratégie proposée devra en outre montrer une robustesse aux inconnues liées à la transition énergétique.

- Le passage d'une stratégie fondée sur un âge de renouvellement et un risque acceptable fixés a priori à une stratégie fondée sur la minimisation du risque en termes de théorie de la fiabilité. Cela nécessite entre autres l'établissement d'un « référentiel des conséquences » partagé.

- Une optimisation des méthodes de déploiement des stratégies de gestion d'actifs permettant de respecter les contraintes techniques (consignabilité du réseau), de ressources, tout en s'harmonisant avec les autres opérations sur les actifs (projets de développement).

Tout cela reposera en grande partie, dès aujourd'hui mais aussi dans la durée, sur un socle de données structurées de qualité et sur des outils robustes.

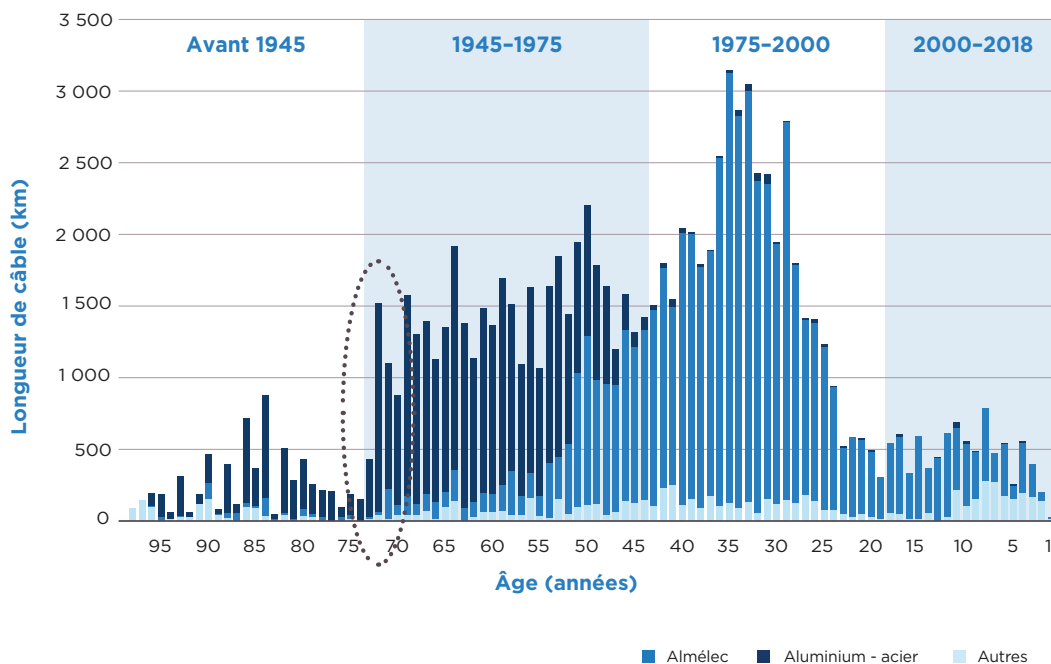


Figure : Pyramide des âges des conducteurs aériens.

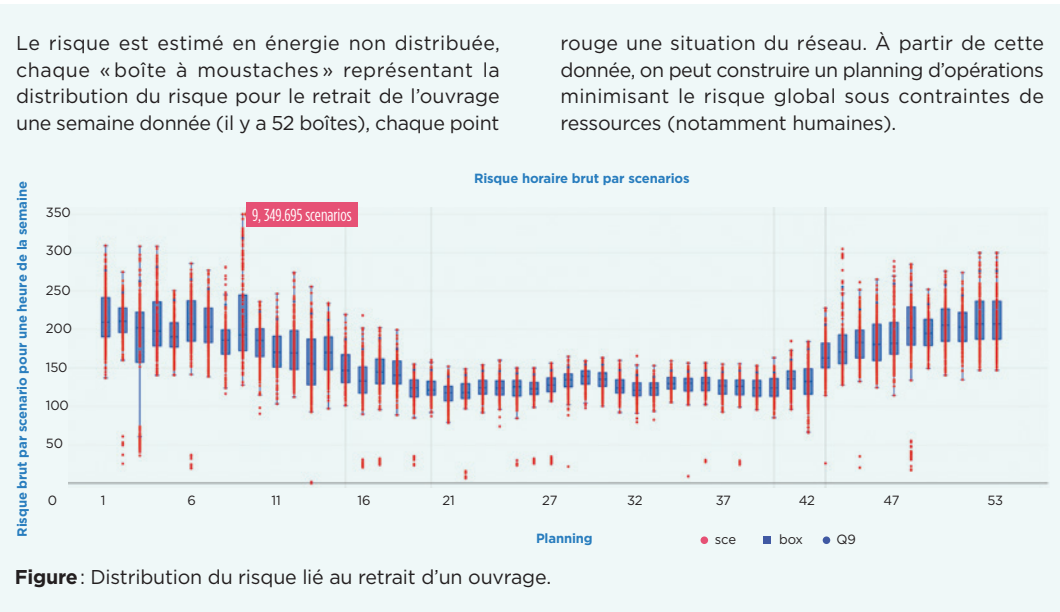
— Ambition

Mettre à disposition de RTE, au moins au stade de prototype industriel, une suite cohérente d'outils et de méthodes permettant d'effectuer des choix « optimaux »

et auditable sur des échéances allant de la stratégie globale de gestion des actifs à la planification détaillée des opérations.

— Objectifs

Orientation de la gestion des actifs	Permettre à RTE de proposer la meilleure stratégie de gestion d'actifs, des moyens alloués pour maintenir et renouveler le réseau. Cela passe par l'établissement de lois de survie dans des conditions diverses (maintenabilité, réparabilité, covariables), l'établissement d'un référentiel partagé des conséquences de la défaillance, le perfectionnement des techniques de simulation holistique déjà utilisées pour le SDDR.
Déploiement des politiques de gestion d'actifs	Aboutir à des prototypes opérationnels pour les étapes de programmation (répartition des opérations entre les années sur une durée de quatre à huit ans) et de planification (placement précis des opérations sur une ou deux années). Ces deux phases intègrent de façon croissante une connaissance fine des contraintes et des matériels régionaux.
Enseignement et partage ⁶	Publier les travaux sur les politiques optimales et diffuser la bibliothèque logicielle associée en open source, afin de favoriser le partage.



(6) La publication des résultats dans des revues scientifiques de référence, outre l'aspect positif du partage, permet d'assoir les futures décisions de RTE sur des travaux scientifiquement validés. C'est donc, là où c'est possible, un objectif important.

3.4 PROGRAMME FUTURS CYBER-PHYSIQUES ET ÉCO-CONÇUS DES INFRASTRUCTURES DU RÉSEAU

— Contexte

Ce programme fait suite au programme «Évolution de l'infrastructure de réseau» mené sur la période 2016-2020. Les objets techniques explorés concernent les éléments **fondamentaux indispensables et pérennes** du réseau de transport d'énergie électrique : les liaisons, les postes, les installations à électronique de puissance et courant continu (DC), le contrôle commande des postes et l'architecture de pilotage du système. Chacun de ces éléments constitue un thème de recherche à part entière.

Le terme «éco-conçus» décrit une modalité de conception et de développement de ces futures infrastructures qui intègre les critères d'impacts environnementaux (empreinte CO2, consommation de matières rares, effet sur la biodiversité) en complément des critères de performance technique et économique.

Le terme «cyber-physique» s'applique plus particulièrement aux thèmes «architecture de pilotage», «contrôle commande» et «électronique de puissance et courant continu». Il met en évidence l'intrication accrue des infrastructures physiques et numériques du réseau et plus spécifiquement dans le pilotage (temporalité, lieu, lois de commande) de leurs différentes fonctions.

Le thème «liaisons» englobe les liaisons aériennes, les câbles souterrains et sous-marins, tant les conducteurs que tous les accessoires constitutifs des différents types de liaison (le pylône, les fondations, les isolateurs, les dispositifs d'ancrage).

Le thème «postes» englobe les postes en technologie aérienne, les postes en bâtiment (Poste Sous Enveloppe Métallique) et maintenant également les postes en mer (posés ou flottants) tant pour les composants électrotechniques que les composants de structure (clôtures, bâtiments, nouveaux outillages autonomes).

— Ambition

Le programme a vocation, d'une part, à faire étudier et à faire évoluer les éléments de l'infrastructure du réseau identifiés comme source de limitations, et, d'autre part, à amener ces technologies à maturité par le moyen de simulations, maquettes et systèmes installés en environnement représentatif. Le tout dans le cadre de projets RTE ou en consortium avec d'autres partenaires français et européens.

In fine, l'objectif est d'intégrer tout ou partie de ces travaux dans les référentiels techniques de normalisation et dans les cahiers des charges des futurs déploiements industriels de RTE.



3.4.1 ARCHITECTURE DE PILOTAGE DU SYSTÈME HYBRIDE CYBER-PHYSIQUE

— Contexte

Le pilotage du système électrique repose sur un modèle à trois couches : la protection (de type action réflexe) au plus près de l'ouvrage surveillé tel une ligne ou un transformateur, le contrôle commande pour des actions coordonnées par des logiciels de type automates locaux dans le poste électrique (un premier point de regroupement), l'optimisation par la conduite du réseau par le dispatcher et un ensemble de logiciels d'analyse ou d'actions de type automate ou réglage secondaire, nécessitant une vue plus globale et visant principalement à piloter les grandeurs macroscopiques du système électrique (tension, équilibre offre-demande, gestion des transits). Ce modèle à trois couches peut s'utiliser à la fois sur des fonctions déployées à un niveau local et d'autres à un niveau centralisé :

- De manière locale par des automatismes et des protections qui assurent des fonctions simples, sûres et rapides, basées sur des informations locales et visent principalement à la protection des biens et des personnes,
- De manière centralisée par des automatismes et systèmes, qui permettent des actions coordonnées à l'échelle de tout le système, avec des algorithmes complexes, des temps d'actions plus lents et la nécessité de recueillir des informations provenant de l'ensemble des composants du réseau.

La multiplication des moyens de production décentralisés, du stockage et de l'électronique de puissance, une dynamique de fonctionnement beaucoup plus rapide et une prévisibilité limitée rendent alors le pilotage du système d'autant plus complexe. L'architecture de pilotage actuelle ne permettra pas de tirer profit de l'ensemble des moyens d'actions (appelés flexibilités) rendus disponibles par les centaines d'automates.

— Ambition

Avec ces travaux, RTE cherche à doter ses différents métiers des méthodes et outils nécessaires à la réalisation de leurs missions dans ce contexte d'évolution technologique. Ainsi les métiers du développement logiciel et du contrôle-commande, les métiers de l'ingénierie, de l'exploitation et de la maintenance seront équipés pour répondre aux enjeux d'un système électrique entremêlant objets et systèmes réels, objets et systèmes modélisés par simulation, logiciels de

protection, de contrôle commande et d'optimisation. Un tel système de systèmes est appelé système hybride cyber-physique (ou CPS).

L'ambition de la R&D est en particulier d'étudier l'intérêt pour RTE des architectures de pilotage du réseau électrique plus décentralisées que celles actuellement utilisées, sur un périmètre dépassant celui des automates de gestion des transits et d'identifier ou de créer les outils et les méthodes pour les concevoir et les valider.

— Objectifs

Modélisations	Explorer les modélisations d'une architecture globale de pilotage: • Modélisation architecture système centralisé / décentralisé avec coordination des couches d'actions Protection – Contrôle – Optimisation, incluant les systèmes et protocoles de télécommunications nécessaires à ces actions. • Mécanismes de collaboration entre les différentes entités d'un Système adaptatif et collaboratif.
Conception et validation	Explorer la conception et validation des «systèmes cyber-physiques» (CPS) (méthodes, outils, performance de la co-simulation réseau électrique – automates – réseaux de télécommunication).
Implémentations possibles	Imaginer l'implémentation et les infrastructures nécessaires (réseaux de télécommunications: applications d'analyses et de synthèses, exécutées localement ou le plus proche possible du procédé surveillé ou commandé, ie «Edge Computing», transmissions d'information aux clients, en intégrant les préoccupations de sécurité informatiques des échanges de données et d'estimation d'empreinte écologique de ces transferts de données.
Cas d'usages	Examiner spécifiquement les cas d'usages d'implémentation décentralisée (automates, gestion locale de la tension, chemin optimal d'exploitation des zones, ...) avec utilisation du modèle «MPC» (Model Predictive Control) ⁷ par un automate de résolution de contraintes. Il s'agit ensuite de coordonner l'action des différents automates pour une gestion multizone. Enfin, la faisabilité et les avantages/inconvénients d'une architecture technique distribuée versus centralisée seront étudiés.

— Collaborations

Pour répondre aux enjeux d'une numérisation ouverte et souple, RTE a rejoint un consortium industriel proposé par l'IRT SystemX dont les missions s'articulent

autour de l'hybridation entre l'IA, les connaissances métier et les modèles physiques pour accélérer les calculs nécessaires à la simulation augmentée.

(7) Le Modèle MPC conçu par la R&D de RTE examine à chaque itération de temps comment lever une contrainte de transit maximum sur une ligne pour une zone géographique électrique donnée. Il recense et choisit la parade la plus efficace selon les contraintes temporelles connues parmi l'ensemble des leviers de flexibilité dont l'algorithme a connaissance sur la zone, ie les moyens d'actions sur les batteries, l'envoi d'ordres de modification de production ou d'ouverture de disjoncteur. L'automate envoie ensuite les ordres.

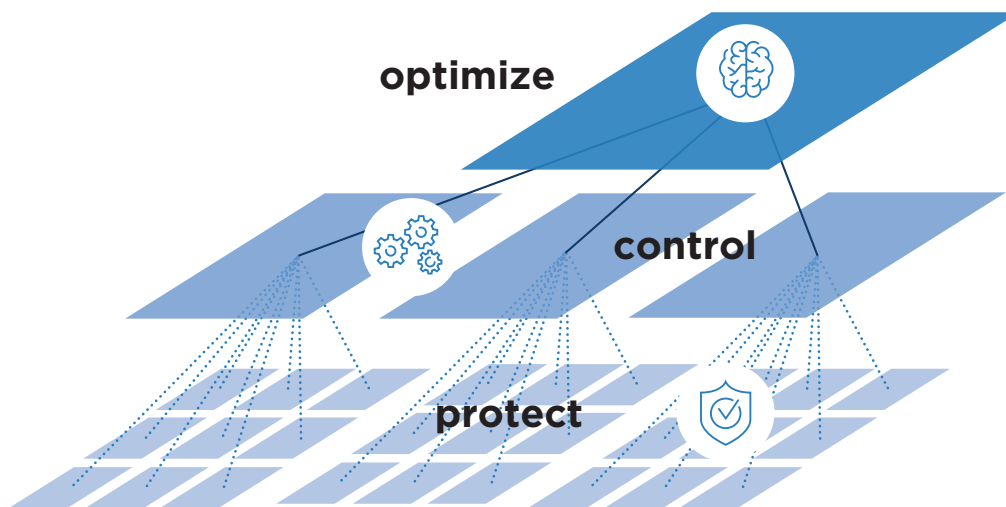


Figure: Modélisation à trois couches d'une architecture de pilotage

3.4.2 CONTRÔLE COMMANDE

— Contexte

La numérisation ou digitalisation des équipements a modifié progressivement et profondément les installations de contrôle-commande des 2700 postes électriques de RTE. C'est l'objet des projets industriels SMART ELECTRE et R#SPACE de remplacement des systèmes de contrôle-commande de poste. Cet essor de la numérisation et des télécommunications a pour conséquence la multiplication des équipements électroniques, dont la fourniture et l'interopérabilité deviennent critiques pour l'entreprise.

— Ambition

À l'instar des travaux menés en télécommunications et industries automobiles, les techniques de virtualisation des systèmes temps réels devraient pouvoir trouver une transposition dans le contrôle commandes des installations électriques. Il s'agit de remplacer les équipements matériels par des modules logiciels indépendants qui s'exécutent sur une plateforme logicielle, et sur des matériels « sur étagère ». La virtualisation, véritable rupture technologique, doit apporter un gain économique

à l'achat, avec une réduction majeure des équipements nécessaires et une simplification de l'ingénierie des travaux associés et une généralisation du télédiagnostic, de la téléadministration et de la télémaintenance.

La Feuille de Route « Contrôle Commande », à moyen terme, doit démontrer la faisabilité d'une solution virtualisée et open-source de contrôle-commande des postes électriques, dans le cadre des plans de protection actuels. À long terme, l'ambition est de réinterroger ces plans afin d'améliorer leurs performances techniques – i.e., la sécurité et la sûreté. Par ailleurs, la Feuille de Route revisite les systèmes d'alimentation auxiliaire des postes électriques pour tenir compte des progrès en stockage et en électronique de puissance, et intégrer l'optimisation de l'empreinte environnementale de RTE, ceci dans le contexte des nouvelles architectures de contrôle commande.

— Objectifs

Virtualisation ouverte des fonctions de contrôle-commande des postes	Réalisation en plate-forme d'un démonstrateur virtualisé du contrôle commande d'un poste 225 kV/63 kV dans une solution virtualisée de propriété constructeur. Instruction du développement d'une plateforme logicielle Open Source maîtrisée par RTE et à même d'accueillir des modules applicatifs multifournisseurs (à destination du projet R#Space).
Évolution des plans de protection	Réinterroger les plans de protections en prenant en compte la pénétration croissante des productions décentralisées et les nouvelles possibilités techniques, notamment la virtualisation.
Revisite des services auxiliaires de postes	Revisiter les besoins et les contraintes techniques des postes électriques (taux harmoniques, ...), établir l'état de l'art des solutions pour les services auxiliaires, définir et valider des architectures privilégiées. Cela s'appuie sur une étude confiée notamment au CEA-Tech.

— Collaborations

RTE et l'INP Grenoble – G2Elab collaborent pour étudier le développement de la virtualisation sur un serveur banalisé d'un prototype de protection différentielle contre les défauts d'isolement du réseau de transport et ne nécessitant pas de source de synchronisation externe (de type Global Navigation System comme le GPS ou GALLILEO) évitant ainsi une dépendance non maîtrisée.

RTE et SCHNEIDER ELECTRIC France collaborent sur la virtualisation d'un contrôle commande de poste HTB. La solution dispose d'une interface permettant d'intégrer les algorithmes spécifiques et développés par RTE ou des tiers.

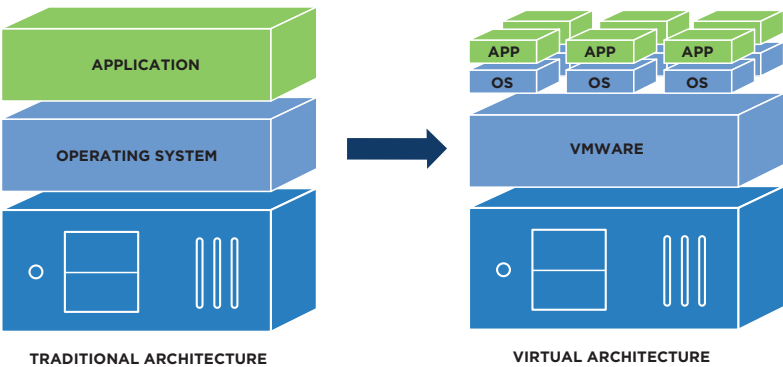


Figure : Modèle pour la virtualisation

3.4.3 ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE ET COURANT-CONTINU

— Contexte

Le déploiement d'équipements à base d'électronique de puissance au sein du système électrique va s'accélérer dans les années à venir. Cette accélération s'explique par l'insertion massive d'énergies renouvelables, par le fort développement des interconnexions en Courant Continu et plus globalement par la numérisation de l'économie. En effet, le TYNDP (Ten Year Network Development Plan) prévoit que la moitié des investissements de développement de réseau sur les 10 prochaines années sera allouée à des liaisons HVDC. Or ces liaisons, tout comme les énergies renouvelables, s'interfaçent généralement avec le réseau par de l'électronique de puissance. À cela s'ajoute les nouveaux types de consommateurs: véhicules électriques, datacenter, stockage.

Avec ce foisonnement inédit d'équipements actifs, les interactions entre réseau alternatif et continu augmentent. Le système devient alors plus complexe, accroissant les risques sur la durée de vie du matériel: par exemple, le risque de résonnance des câbles. Par ailleurs, le domaine du courant continu et de l'électronique de puissance est encore récent, en pleine évolution technologique et tiré par la transition numérique.

— Ambition

Cette feuille de route tente de répondre en partie à ces défis nouveaux à travers deux ambitions. La première consiste à appuyer le quotidien et répondre aux enjeux du Projet d'Entreprise, par exemple en s'efforçant de limiter les risques d'interactions causées par le foisonnement des équipements à base d'électronique de puissance. La seconde, qui répond à une vision de plus long terme, vise à anticiper les évolutions profondes et éclairer la stratégie de RTE, par exemple en ce qui concerne des raccordements en courant continu.

— Objectifs

Offres de raccordement DC et réseaux à courant continu	Études de la faisabilité d'une offre de raccordement en courant continu pour des clients industriels (producteurs, consommateurs, stockage). Cela permettrait notamment de mutualiser les convertisseurs AC/DC actuellement à leur charge et d'accroître l'efficacité globale du système.
Interactions et interopérabilité dans un système hybride AC/DC	Maintien de l'effort d'étude des aspects méthodologiques et de modélisation spécifiques aux composants de l'électronique de puissance.
Nouvelles opportunités offertes par les équipements à base d'électronique de puissance	Détection de fonctions ou capacités spécifiques de composants innovants à base d'électronique de puissance et équipements associés, puis validation par des maquettes à l'échelle réduite (Solid State Transformer, transformateur DC/DC). Par exemple, la validation des fonctions nouvelles apportées par un limiteur de courant supraconducteur en DC.

— Collaborations

RTE a établi une collaboration avec Arts et Métiers – Centrale Lille – Laboratoire Electrotechnique et Electronique de puissance L2EP (Lille) sur le thème des interactions réseaux AC et DC et de l'interopérabilité. La durée prévue pour cette collaboration est de 5 ans (2017-2021), et une reconduction est envisagée;

RTE et Supergrid Institute (Lyon) ont signé un accord de collaboration sur le thème de l'électronique de puissance.

RTE et Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) ont signé un accord de collaboration pour étudier un concept innovant de convertisseur alternatif-continu qui combine plusieurs niveaux de tension côté continu.

RTE a signé un accord de collaboration (août 2020 – août 2024) avec l'Université Catholique de Louvain (KU Leuven) pour étudier l'implémentation de contrôles de type «grid forming» dans une liaison à courant continu (HVDC) configurée en bipôle.

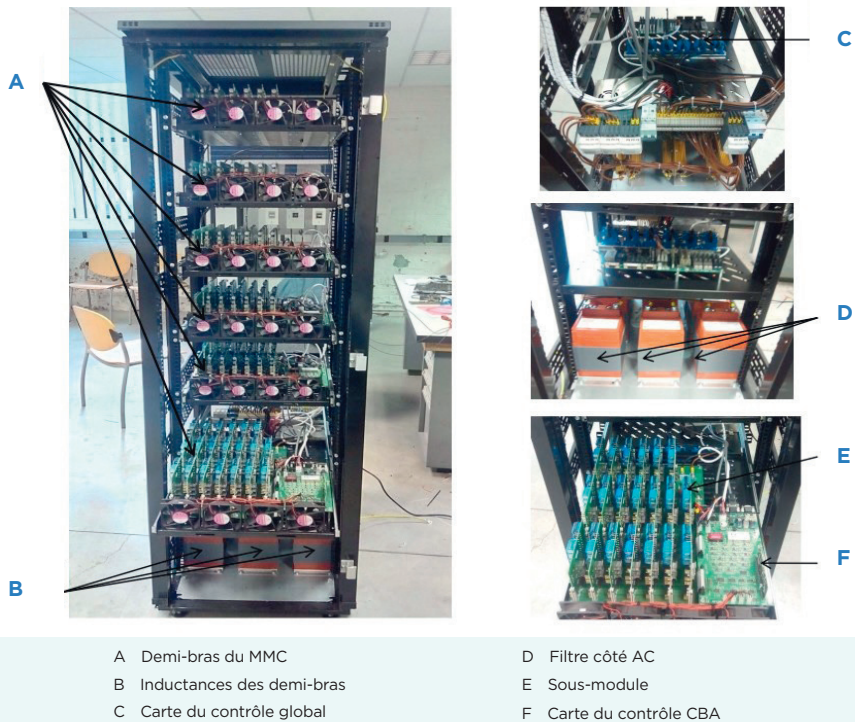
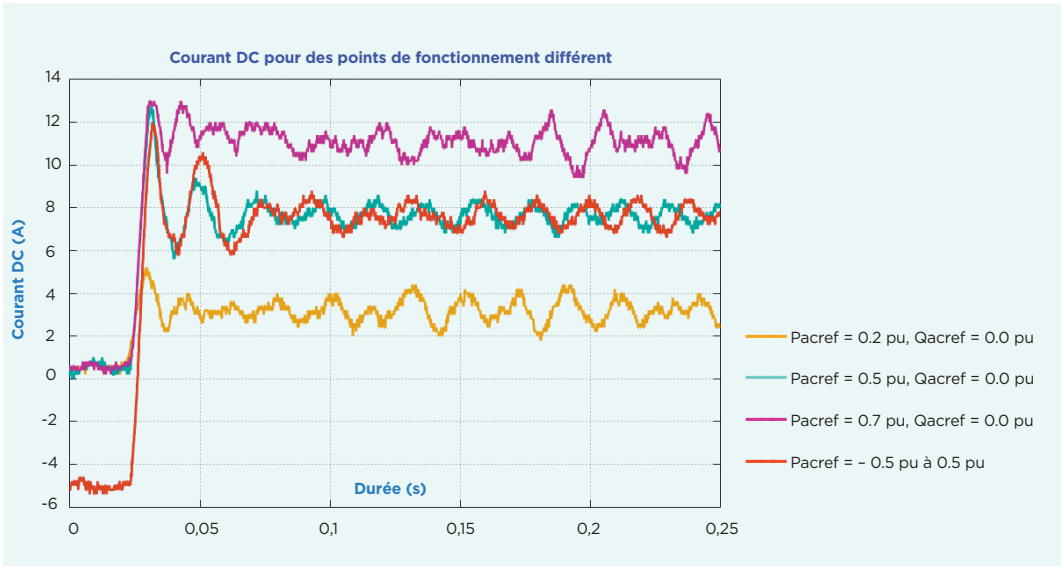


Figure: Travaux de modélisation et comparaison avec une maquette par Arts et Métiers - Centrale Lille - Laboratoire Electrotechnique et Electronique de puissance L2EP (Lille)

3.4.4 FUTURS DES INFRASTRUCTURES LIAISONS

— Contexte

Le réseau de transport d'électricité, constitué de 100 000 km de lignes aériennes (LA) et 6000 km de liaisons souterraines (LS), évolue en permanence. Il évolue pour assurer le raccordement de nouveaux clients, des nouveaux producteurs, pour établir des interconnexions, incluant des liaisons sous-marines (LSM), mais aussi pour renouveler progressivement les infrastructures construites au cours du siècle dernier⁸. La technologie DC constitue une offre nouvelle en progression, en particulier pour les interconnexions.

Ces ouvrages, d'une durée de vie d'environ 80 ans, façonnent à leur manière les paysages et l'aménagement des territoires: ils portent nativement des enjeux sociétaux et, par les surfaces d'emprise au sol mobilisées, pourraient être une formidable opportunité d'être source de régénération de biodiversité.

— Objectifs

Design de la nouvelle Génération Green Liaison	Détermination des points d'amélioration à partir des analyses de cycle de vie LA et LS en domaine HTB. Étude de la compréhension des interactions avec les fonds marins et sa faune avec France Energie Marine. L'innovation dans les constituants à améliorer intégrera les démarches d'éco-conception et le Biomimétisme (par exemple, matériaux avec moindre émission de gaz à effets de serre, moindre impact sur la biodiversité).
Les composants électriques	Renforcer l'efficacité énergétique des liaisons par l'innovation dans le domaine des composants électriques, on recherchera notamment la réduction du bruit en raison de l'effet couronne et la diminution des pertes électriques.
Les outils, méthodes et matériaux	Innover dans les outils, méthodes et matériaux des accessoires autour de la liaison afin de mieux pouvoir l'exploiter dans la durée avec de meilleures performances. Par exemple, le test de solutions de biocalcification des sols sableux, pour augmenter l'effet de dissipation thermique et le renforcement mécanique, en remplacement de fouilles de liaison souterraine en béton.

— Collaborations

CEEBIOS - Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis. Le Vivant, via l'approche biomimétique, pourra être source d'inspiration pour ces composants d'infrastructure liaisons du futur, qui demeurent objet de R&D en regard de ces enjeux.

Soletanche Bachy: démarrage fin 2020 d'une collaboration pour l'évaluation de la preuve de concept

— Ambition

Au-delà de l'efficacité électrique et de la performance économique, comment construire ou renouveler nos liaisons électriques dans le futur en intégrant tous les enjeux environnementaux et sociétaux: multifonctionnalité, usages partagés avec les Tiers, limitation de la contribution à l'effet de serre, sobriété des ressources minérales non fossiles, restauration de biodiversité? Est-il possible d'aller vers des liaisons 100% recyclables, neutres en bilan carbone, à empreinte environnementale positive, avec usages partagés?

L'ambition de la R&D est de développer les liaisons de nouvelle génération comme lien électrique, environnemental et sociétal et pour cela de dépasser les principaux verrous: dépendance aux fournisseurs, contraintes financières et performance technique.

concernant l'application du procédé BIOCALCIS®, en substitution de solutions employant du béton aux Liaisons Souterraines RTE.

France Energies Marines: la collaboration avec cet institut de recherche permet de faire progresser l'étude des interactions entre monde marin et objets techniques nécessaires à l'évacuation d'énergie des parcs éoliens offshore.

(8) cf. schéma de développement SDDR 2019

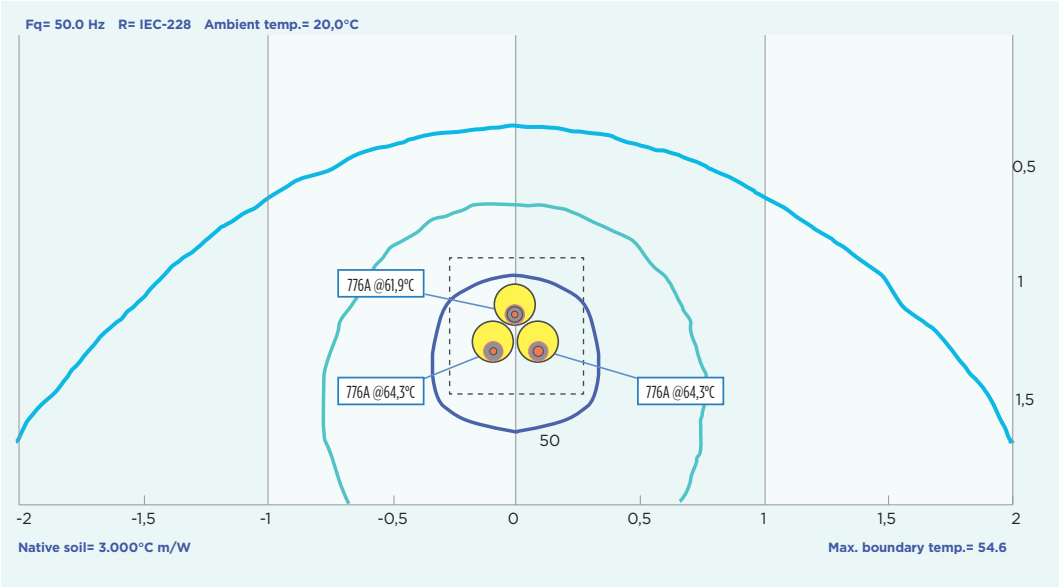


Figure: Tubes PEHD (polyéthylène haute densité) enrobés de BIOCALCIS®



3.4.5 FUTURS DES INFRASTRUCTURES POSTES

— Contexte

Le poste électrique est un objet essentiel et pérenne du fonctionnement du réseau électrique : il permet l'orientation des flux de courant selon les besoins de l'exploitation du système, ainsi que la transformation et le pilotage de la tension. Sa fonction de nœud électrique s'est doublée au fil du temps d'une fonction de nœud (hub) fournisseur de données de mesures de toute nature (états électriques, alarmes, surveillance du vieillissement...).

Traditionnellement poste ouvert aérien (isolement à l'air atmosphérique) ou poste en bâtiment avec isolation gazeuse, le développement en cours des parcs éoliens

« offshore » conduit à mettre au point le poste en mer (émergé et fixé au fond, puis émergé flottant en eaux profondes, voire immergé) pour la collecte et le raccordement au réseau terrestre.

— Ambition

Le poste électrique concentre certains enjeux environnementaux et sociétaux de développement durable : la limitation de la contribution à l'effet de serre (par le gaz SF6 en particulier), la restauration de la biodiversité ou encore la réduction de la consommation de ressources minérales non fossiles.

Pour l'ensemble des types de postes, aérien, en bâtiment ou en mer, les nouvelles technologies et des principes de conceptions innovants seront considérés en application.

— Objectifs

Les composants électriques	Étudier l'insertion des nouvelles technologies, les tester en plateforme puis en site représentatif. Par exemple, les disjoncteurs 225kV et 400kV à gaz à faible effet de serre, les transformateurs de mesure sans huile ou sans gaz à effet de serre. Pour les postes en mer, et en particulier flottant, l'effet des déplacements et accélérations des composants électriques sera étudié, dans le cadre de l'arrimage articulé des câbles dynamiques.
Les composants d'infrastructure et d'aménagement	Étudier l'insertion de nouveaux matériaux et nouvelles technologies dans les postes avec un objectif d'effet positif sur l'environnement. Par exemple: maîtriser les fuites de gaz à effet de serre, étudier les charpentes sans peinture, les matériaux bas carbone et à stockage de carbone pour les pistes/fourreaux/clôtures. Pour les postes en mer, les dispositifs d'amarrage seront étudiés.



Figure: Poste 63 kV de GRIMAUD: expérimentation du premier poste RTE à gaz isolant à faible effet de serre, mis en service en juin 2019.

— Collaborations

CEEBIOS - Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis.

France Energies Marines: la collaboration avec cet

institut de recherche permet de faire progresser l'étude des interactions réciproques entre monde marin et objets techniques nécessaires à l'évacuation d'énergie des parcs éoliens offshore.



3.5 PROGRAMME ENVIRONNEMENT, SOCIÉTÉ ET PROSPECTIVE

Afin d'aider RTE et les pouvoirs publics à préparer le futur du système et des réseaux électriques, ce programme vise à développer un regard complet du système énergétique, technico-économique, social et environnemental, en dépassant l'analyse tendancielle pour appréhender l'énergie dans un monde en transformation profonde.

— Contexte

« Un Regard environnemental »

Le Green Deal engage l'Europe vers la neutralité carbone, la régénération de la biodiversité et l'économie circulaire. Ces enjeux auront une traduction économique et réglementaire croissante, qu'il est nécessaire d'anticiper, vu la durée de vie longue des infrastructures énergétiques : 20, 40, 60 ans voire plus pour les infrastructures de transport. Pylônes, conducteurs, centrales nucléaires, éoliennes et panneaux photovoltaïques ne doivent plus seulement être qualifiés en puissance, en énergie et en euros, mais aussi en gaz à effet de serre, tonnes de matière non recyclées, rejets toxiques, sols artificialisés, destruction ou régénération de la biodiversité, etc.

« Un Regard social »

Le réseau électrique est un objet fondamentalement social : une mutualisation consentie de moyens (ex : financiers) et d'impacts (ex : paysages) qui permettent à la collectivité d'accéder à des économies d'échelle au bénéfice de tous. Ainsi la transition énergétique n'est pas seulement une opération technique, elle affecte cet équilibre social, impliquant notamment les riverains avec l'acceptabilité des nouvelles infrastructures (production et transport), les consommateurs avec les enjeux de sobriété et la flexibilité des usages de l'énergie, ou encore les nouveaux investisseurs locaux voire individuels.

« Un monde en transformation »

Enrayer le changement climatique et l'effondrement de la biodiversité nécessitera des transformations d'autant plus profondes que la vraisemblance d'un découplage fort entre croissance économique et empreinte environnementale est spéculative⁹. La transformation affectera les structures de production, de consommation, plus largement les modes de vie et les aspirations, et *in fine* l'énergie qui les irrigue.

En outre, la société devra s'adapter aux conséquences déjà inévitables de ces tendances, notamment le potentiel exode d'échelle planétaire¹⁰ avec ses implications sociales et géopolitiques majeures. C'est donc dans un monde très différent qu'il faut contextualiser et projeter l'avenir du secteur énergétique.

— Ambition

Les cinq feuilles de routes de ce programme s'inscrivent dans cet effort d'anticipation. Elles sont de nature transverse, en interface avec une grande palette d'autres sujets de R&D et de métiers de RTE :

- **Réseau et biodiversité** : objectiver les relations entre réseau et biodiversité, mettre ces connaissances au service de la concertation et tendre vers des matériels et pratiques régénératrices de la biodiversité ;
- **Énergie Réseau et Société** : comprendre les dynamiques des relations entre l'énergie, le réseau et l'ensemble des parties prenantes de la société, mettre ces connaissances au service des différents métiers concernés (concertation, prospective, gouvernance, marchés...);
- **Éco-conception, analyses environnementales et de résilience** : objectiver les impacts environnementaux et sur la résilience, et les prendre en compte dès la conception ;
- **Système énergétique futur** : mettre RTE en position de pouvoir analyser l'ensemble du système énergétique européen, afin d'anticiper correctement les futurs possibles du système électrique français ;
- **Gouvernance et Régulation** : proposer des évolutions structurelles de la gouvernance du transport et du système électrique (incluant les architectures de marchés) en vue d'intégrer les nouvelles dynamiques territoriales, sociétales et de politiques énergétiques tout en maintenant la sûreté et l'efficacité du système.

(9) "Globally, growth has not been decoupled from resource consumption and environmental pressures and is not likely to become so". Agence Européenne de l'Environnement, [publication consultée le 3/6/21](#).

(10) 1 à 3 milliards d'humains vivront en climat hostile d'ici 2070, c'est-à-dire en dehors de la « niche climatique » habitée par l'humanité depuis 6 000 ans au moins. Dans le scénario pessimiste, un tiers de la population mondiale connaîtrait une température moyenne annuelle de plus de 29°C, ce qu'on ne trouve actuellement que sur 0,8% de la surface terrestre, principalement dans le Sahara. «Future of the human climate niche» PNAS May 26, 2020 117 (21) 11350-11355.

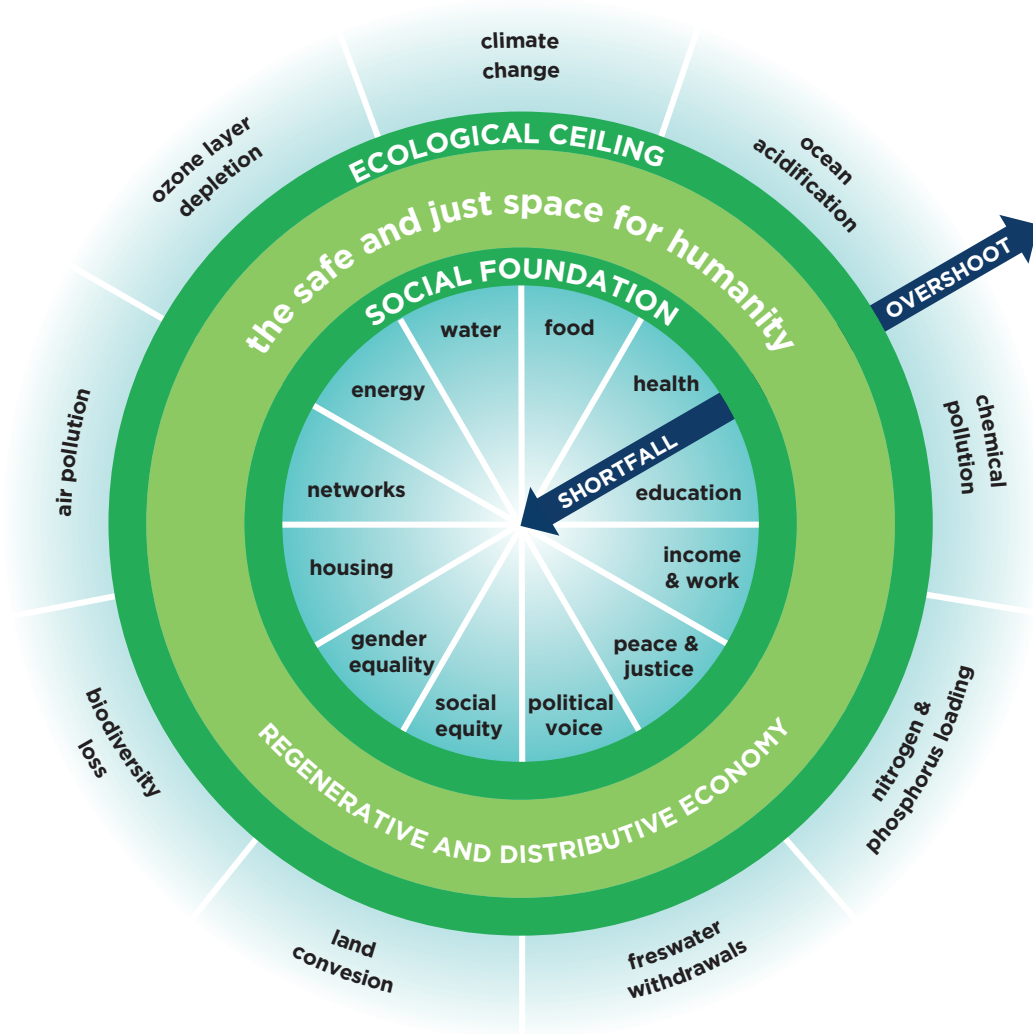


Figure : Le modèle «Doughnut Economics» initié par [Kate Raworth](#) illustre les limites à prendre en compte pour une économie durablement en équilibre environnemental et sociétal. Il inspire notre cadre d'analyse des futurs possibles du système énergétique.

3.5.1 ÉCO-CONCEPTION, ANALYSES ENVIRONNEMENTALES ET DE RÉSILIENCE

— Contexte

Face à des menaces qualifiées « d'existentielles » par la Commission Européenne, le Green Deal engage l'Europe dans une transition multiple, vers la neutralité carbone, la régénération de la biodiversité et l'économie circulaire. Ces « externalités » sont appelées à avoir progressivement une traduction économique et réglementaire de plus en plus forte. En outre, la dégradation du climat et de l'effondrement de la biodiversité sont en partie déjà irréversibles, ce qui induit des nouveaux risques et un besoin croissant de résilience.

Il s'agit donc de systématiser la prise de décision basée sur une acception globale de la valeur, comprenant non

seulement les critères technico-économiques conventionnels, mais aussi des critères environnementaux, sociaux et de résilience. En outre, les progrès sur ces critères seront d'autant plus importants et d'autant moins coûteux qu'ils auront été pris en compte dès la phase de conception, qu'il s'agisse de la conception des matériels ou de la préfiguration du mix électrique futur dans les études prospectives. Ainsi il s'agit de généraliser l'éco-conception.

— Ambition

Cette feuille de route vise à doter RTE de méthodes et outils pour mesurer les impacts de nos activités en termes environnementaux, sociaux et de résilience en complément des analyses technico-économiques, ainsi que, sur la base de ces diagnostics, d'explorer et d'offrir des solutions pour concrètement passer à l'action pour des réalisations éco-conçues.

— Objectifs

Analyse environnementale	Développer des solutions d'évaluation d'impacts environnementaux en cycle de vie des infrastructures de réseaux électriques et du système énergétique, jusqu'à l'échelle européenne. L'état de l'art des analyses en cycle de vie (ACV) est assez mature pour les produits manufacturés. Mais la recherche en ACV et autres approches reste nécessaire pour les systèmes complexes (électrique, énergétique), pour l'évaluation sociétale (emplois, droits humains...) ou encore pour des approches plus dynamiques et spatialisées. Des progrès sont nécessaires aussi sur les données, tant sur leur complétude et leur transparence que leur structuration et leur gouvernance.
Analyses de criticité matières	Développer des méthodes et outils d'aide à la décision pour traiter les risques liés aux matières premières : approvisionnement, impacts environnementaux, devoir de vigilance, circularité; dans la continuité des travaux de modélisation d'intensité matière des scénarios de la transition du système électrique.
Analyse sociétale	Développer des solutions d'évaluation d'impacts sociaux en cycle de vie des infrastructures de réseaux électriques et du système énergétique, jusqu'à l'échelle européenne. Contribuer au choix et à la construction d'indicateurs pertinents pour quantifier les impacts sociaux de RTE à différentes échelles de territoires.
Analyse de résilience	Explorer les approches (ex: stress-tests) permettant d'identifier les fragilités du réseau et du système face aux nouveaux inducteurs de risques, notamment les inducteurs environnementaux (ex: climat) et sociaux, pour apporter une vision complémentaire aux risques d'exploitation matériels et électro-techniques.
Éco-conception	Expérimenter et démontrer la faisabilité de solutions et méthodologies inspirées par la Nature (biomimétisme) et les principes de l'économie circulaire.

— Collaborations

Pour l'atteinte de ses objectifs, cette feuille de route mobilise un ensemble de partenaires académiques (Mines ParisTech OIE, BRGM, EcoSD, ADEME, Ceebios,...), industriels (fournisseurs, recycleurs,...), ainsi que de bureaux d'études spécialisés (MicroHumus,...) tant pour les aspects de modélisation et d'analyse que pour l'expérimentation de solutions éco-conçues innovantes. Dans le cadre particulier du

domaine des Energies Marines Renouvelables (EMR), des collaborations multi-acteurs s'inscrivent au sein de France Energies Marines.

Les collaborations avec nos homologues GRTs permettent déjà d'échanger les bonnes pratiques et doivent se renforcer pour faire évoluer la normalisation et interagir ensemble avec nos fournisseurs.

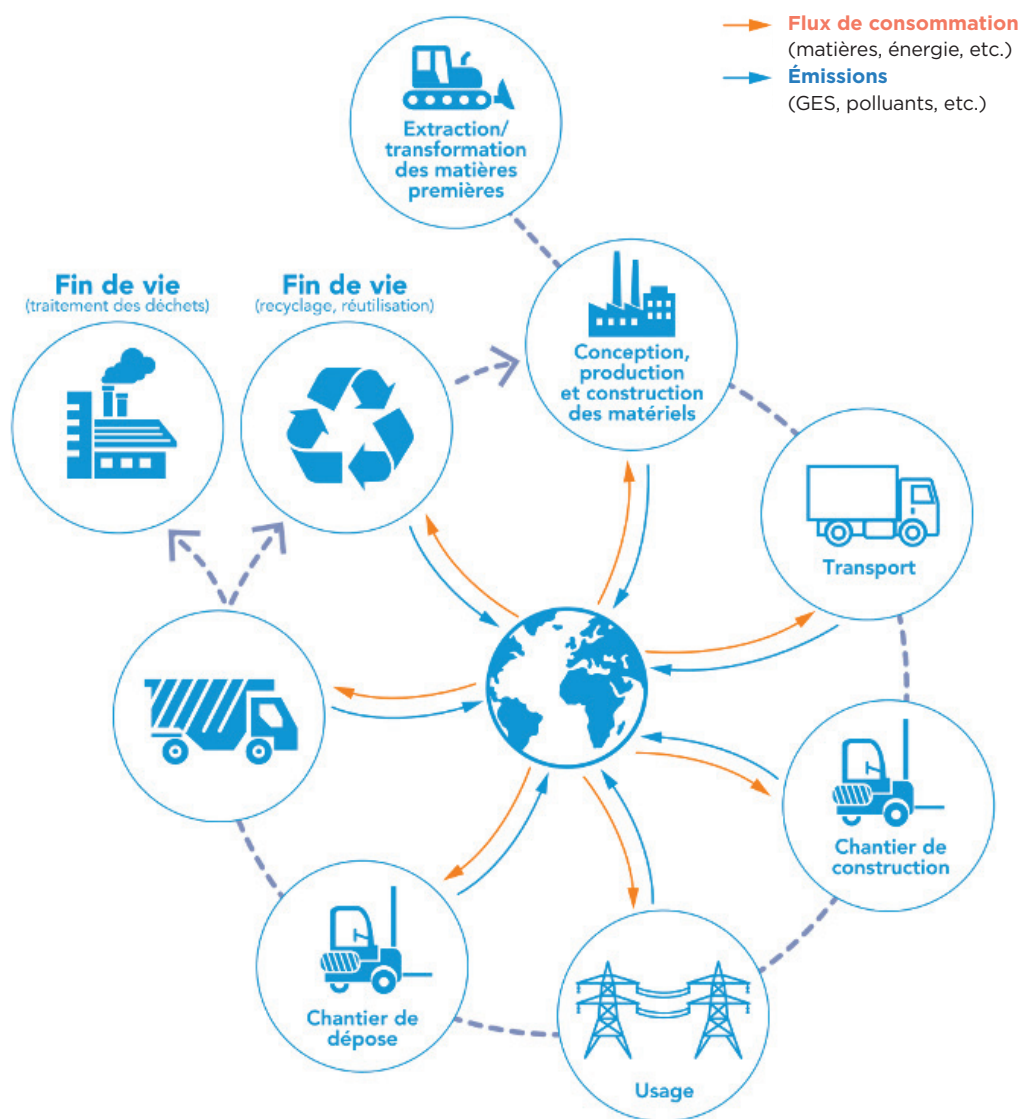


Figure : Cycle de vie des activités de RTE, du berceau à la tombe

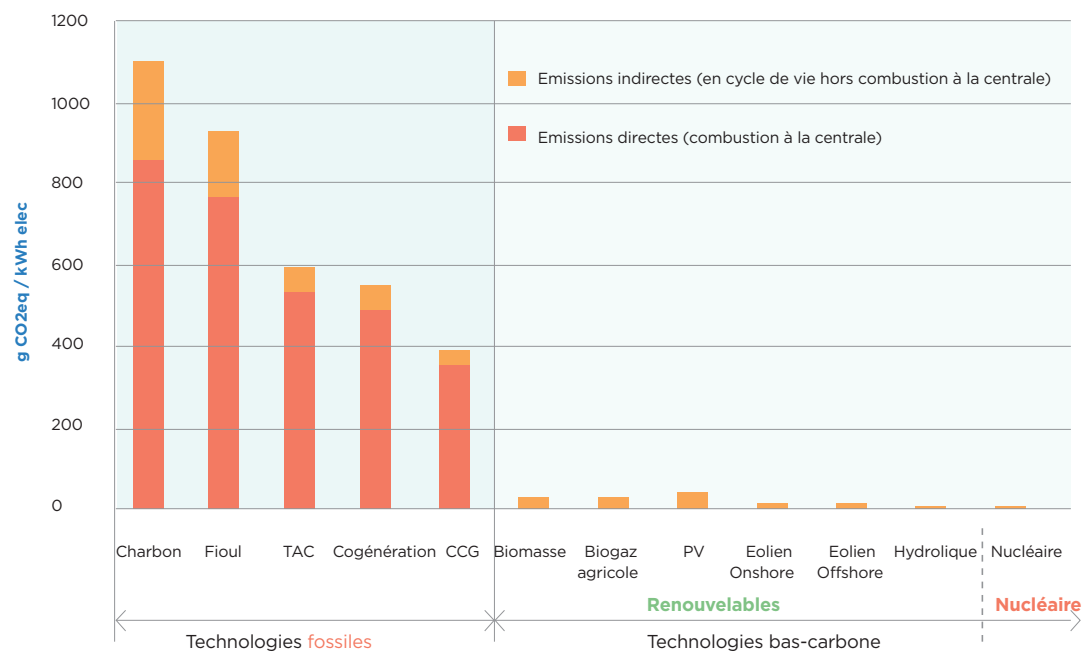


Figure: Facteurs d'émission de carbone en 2020. Extrait du document publié dans le cadre du GT6 Environnement 13/7/2021 de l'exercice « Scénarios 2050 » piloté par RTE.



3.5.2 RÉSEAU ET BIODIVERSITÉ : COMPRENDRE ET RÉGÉNÉRER

— Contexte

Un nombre croissant d'études scientifiques confirme que les taux d'extinction actuels de la biodiversité sont plus de 100 fois supérieurs à ceux ayant eu cours au cours de l'histoire géologique de la planète (source IPBES⁽¹¹⁾). Dans ce contexte d'effondrement de la biodiversité, la relation entre les infrastructures électriques et le vivant est d'importance croissante.

Le réseau de transport d'électricité de haute et très haute tension irrigue la France avec ses 100 000 km de circuits aériens, 275 000 pylônes, 6 000 km de liaisons souterraines et 2 700 postes électriques. Il s'étend au milieu sous-marin avec 1 500 km de projets de raccordements électriques de fermes éoliennes et postes électriques off-shore. Cette emprise a des effets sur la biodiversité, qu'il s'agit d'évaluer et de faire évoluer avec l'objectif d'une cohabitation positive.

— Ambition

L'ambition de cette feuille de route est d'améliorer la capacité de RTE :

- à comprendre les interactions de l'infrastructure avec le paysage, les milieux et les organismes vivants, par des approches scientifiques rigoureuses ;
- à exploiter cette connaissance pour développer des solutions de réseaux qui réduiront les impacts négatifs et contribueront à la régénération de la biodiversité, qui est un des objectifs engagés par le Green Deal.

— Objectifs

Accès et installation des infrastructures électriques	Nouvelles méthodologies pour les études d'impacts et inventaires biologiques, notamment en milieu marin, qui sont nécessaires a minima avant travaux, voire pendant l'exploitation. Elles concernent les effets du bruit, la pollution de l'air et de l'eau, la dégradation de la qualité des sols et des eaux.
Présence de l'infrastructure dans le paysage et maintenance des infrastructures (coupe de la végétation incluse)	Cela concerne « l'effet ressource » des pylônes, qui peuvent servir de perchoirs, reposoirs, et lieux de reproduction. Cela concerne l'emprise des lignes qui peuvent avoir, selon les pratiques de gestion de la végétation et les relations à l'urbanisme et aux parties prenantes, un effet de barrière et de fragmentation, mais aussi une fonction d'accueil et de corridor. Cela concerne aussi les postes électriques à terre (et les modes de gestion de la végétation) et les futurs postes en mer, susceptibles de générer un effet « récif » contribuant à la régénération de la biodiversité sous-marine. Considérés ensemble, ces éléments permettraient-il d'associer au réseau électrique la fonction de corridor écologique, y compris en milieux agricoles, dans une relation positive non seulement avec la biodiversité, mais aussi avec les acteurs et les territoires ?
Effets sur la biodiversité de la transmission de l'énergie	Avec une priorité sur la biodiversité sous-marine, il s'agit, au-delà des effets de la présence des matériels et de leur maintenance, des effets spécifiques de la transmission d'énergie : champs électromagnétiques, électrostatiques, bruits et vibrations.

(11) IPBES (2019): [Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services](#). E. S. Brondizio, J. Settele, S. Diaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany.

— Collaborations

Cette feuille de route repose sur un grand nombre de prestataires (bureaux d'études spécialisés) et partenaires scientifiques externes (Instituts de transition écologique, Universités, Centre de recherches) compétents dans le domaine de la biodiversité. Dans le milieu

marin en particulier, les recherches sont mutualisées au sein de consortia de recherche réalisés avec France Energies marines et d'autres structures telles que les Pôles Mer.

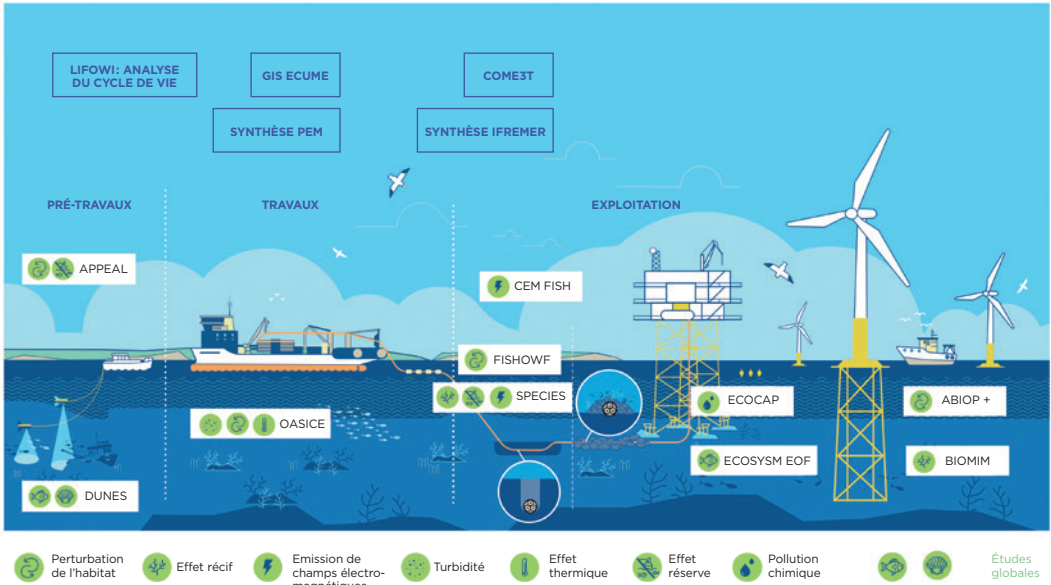


Figure: Vue globale des études d'impacts sur la biodiversité marine



3.5.3 GOUVERNANCE ET RÉGULATION EN PHASE AVEC LA SOCIÉTÉ

— Contexte

Le service public de transport d'électricité est largement l'héritier de décisions prises au niveau national, en vue d'assurer à l'ensemble de la nation un accès à l'électricité dans des conditions technico-économiques optimales. À cette logique nationale, s'est ajoutée la dimension européenne depuis le début des années 2000. Avec la transition énergétique en cours, ces logiques descendantes sont questionnées. Cinq inducteurs principaux nous amènent à reconsidérer la gouvernance et la régulation du système électrique :

1. La remise en cause grandissante des décisions centralisées;
2. La fin de l'unicité technique de la solution apportée par le réseau de transport d'électricité, consécutive au développement des technologies de stockage et numériques;

3. Le renforcement des compétences des collectivités locales dans le domaine de l'énergie, ainsi que les initiatives citoyennes et communautaires permises par le Clean-Energy-Package;

4. Des objectifs très ambitieux de transition énergétique fixés à l'horizon 2030 (-55% émission GES);
5. Des doutes naissant sur la capacité du modèle actuel à assurer durablement la sécurité d'alimentation du pays.

— Ambition

Proposer aux pouvoirs publics des évolutions structurales de la régulation et de la gouvernance du transport d'électricité, éventuellement du système électrique dans son ensemble en vue :

- d'assurer les missions fondamentales de service public du GRT relatives à la sûreté de fonctionnement des réseaux et à la sécurité d'alimentation;
- d'intégrer les nouvelles dynamiques territoriales, sociétales, environnementales et de politiques énergétiques.

— Objectifs

Coordination et révélation de la rareté dans un système à coûts marginaux de production nuls	On attend du marché qu'il révèle la rareté et coordonne les acteurs, pour une exploitation optimale du parc existant à court-terme, et pour orienter les investissements à moyen/long terme. Cette fonction fondamentale du marché devient inopérante dans un système à coûts marginaux nuls, où la valeur est davantage du côté de la puissance et de la flexibilité que du côté de l'énergie. La transition énergétique nécessite de repenser le modèle de marché et la régulation.
Pluralité du produit électricité	La régulation de l'électricité et de ses marchés est fondée sur l'hypothèse d'un produit électricité parfaitement fongible, indiscernable. Les évolutions technologiques, réglementaires et sociétales peuvent conduire à ajouter des attributs au produit électricité: le choix d'un niveau différencié de sécurité pour chaque consommateur, localisation, source d'énergie, communautés énergétiques, etc.
Nouvelles organisations du transport d'électricité et du gestionnaire du réseau de transport	Quelles évolutions possibles de RTE, ainsi que la régulation associée au sens large (le tarif notamment), sous l'hypothèse d'évolutions radicales du contexte découlant des inducteurs de changement rappelés ci-dessus?
Subsidiarité et responsabilité	L'objectif de cette activité - connexe aux activités décrites précédemment - est de travailler avec l'écosystème externe sur le compromis acceptable entre subsidiarité et responsabilité des différentes échelles de décision, du local à l'Europe.
Comptabilité en triple capital, économique, environnemental et social	Dans le sillage de Schneider et Kering, explorer la possibilité d'intégrer les externalités sociales et environnementales explicitement dans la comptabilité de RTE, et <i>in fine</i> dans sa régulation.

— Collaborations

Cette feuille de route mobilise une grande variété de partenaires externes, au sens disciplinaire et au sens du positionnement sur la chaîne de valeur, avec un large spectre de niveaux de maturité des sujets, allant des sujets académiques très amont à des sujets proches de la phase de déploiement industriel. Sans viser l'exhaustivité, les partenariats existants suivants illustrent la diversité des collaborations : l'université de Paris Dauphine dans le cadre d'une chaire sur les marchés européens de l'électricité et dans le cadre d'une chaire sur les mécanismes de régulation ; MinesParisTech dans

le cadre d'une Chaire sur la Théorie de l'entreprise et dans le cadre de travaux sur la solidarité électrique dans un régime d'innovation intensive ; Toulouse School of Economics sur des questions tarifaires ; le CEA sur des sujets relatifs aux véhicules électriques et expérimentations associées ; CentraleSupélec sur des sujets liés à l'utilisation optimale des interconnexions. Des partenariats avec des praticiens de la comptabilité triple capital sont actuellement en cours de montage. Sur plusieurs sujets traités dans la feuille de route, des échanges et travaux avec des homologues européens de RTE sont par ailleurs en cours de développement.



Figure : Cette page publiée par l'association [CLER](#) illustre la revendication d'une gouvernance moins « descendante » de l'énergie

3.5.4 ÉNERGIE, RÉSEAU ET SOCIÉTÉ

— Contexte

La transition énergétique interroge la manière dont les sociétés contemporaines sont transformées par les enjeux liés à la décarbonation de l'énergie, comment les pratiques et les modes de vie des acteurs évolueront ainsi que leurs modalités de mobilisation et d'organisation. Ces questionnements se situent à différentes échelles d'actions, du très global au très local. Ainsi, depuis quelques années, l'énergie est devenue un objet d'études à part entière pour les sciences humaines et sociales, afin de questionner les implications politiques et sociales de l'énergie.

— Ambition

L'ambition de cette feuille de route est de permettre aux différents métiers de RTE d'appréhender et de qualifier les transformations et dynamiques sociétales, territoriales et politiques qui concernent le secteur énergétique. Elle doit également lui fournir les moyens d'en rendre compte dans ses études prospectives, par une approche scientifique robuste et opposable.

— Objectifs

Nouvelles figures du consommateur, usages et modes de vie	Il s'agit d'abandonner l'hypothèse de l'agent économique rationnel, pour qualifier les pratiques énergétiques, actuelles ou émergentes, et plus largement les modes de vie et les organisations collectives qui les sous-tendent, les favorisent ou les contraignent. Cela doit permettre de quantifier des pratiques nouvelles ou envisagées pour réussir la transition énergétique, telles que la sobriété énergétique ou la flexibilité des usages, ainsi que leur articulation avec d'autres enjeux tels que l'habitat, le transport, le travail, l'alimentation etc.
Communs, communautés énergétiques et mobilisations locales	Des nouveaux acteurs peuvent se structurer pour répondre à des besoins non couverts ou imparfaitement couverts, par l'Etat ou le marché et expérimenter, par exemple sous forme de communautés énergétiques, des nouvelles formes d'organisation politiques, juridiques ou économiques. Cet axe vise à explorer ces nouvelles logiques d'action, leurs motivations et leur structuration.
Décentralisation énergétique, stratégies territoriales et place du réseau	Par nature territorialisées, les ENRs participent au processus de décentralisation énergétique, conforté par la décentralisation politique (ex: loi NOTRE). Cette axe vise à en étudier les sous-jacents et les implications, notamment les recompositions territoriales qui en découlent, dans lesquelles la place des réseaux pourrait être questionnée.
Service public, intérêt général et solidarités	Les notions de service public et d'intérêt général sont les fruits d'une construction socio-politique et historique. Cet axe d'étude vise à explorer la manière dont la conception actuelle du service public de l'énergie peut être questionnée par les évolutions sociétales actuelles, ainsi que les instruments de son expression (tarification et principe de péréquation par exemple).



— Collaborations

Pour couvrir ces thématiques, cette FdR mobilise un large champ disciplinaire (sociologie, histoire, économie, droit, sciences de l'aménagement, sciences politiques, anthropologie, géopolitique...) à différentes échelles d'action macro (Europe) au très micro (individus) en passant par de nombreux échelons intermédiaires (territoires, communautés...) et de temps (historique, présent, prospectif).

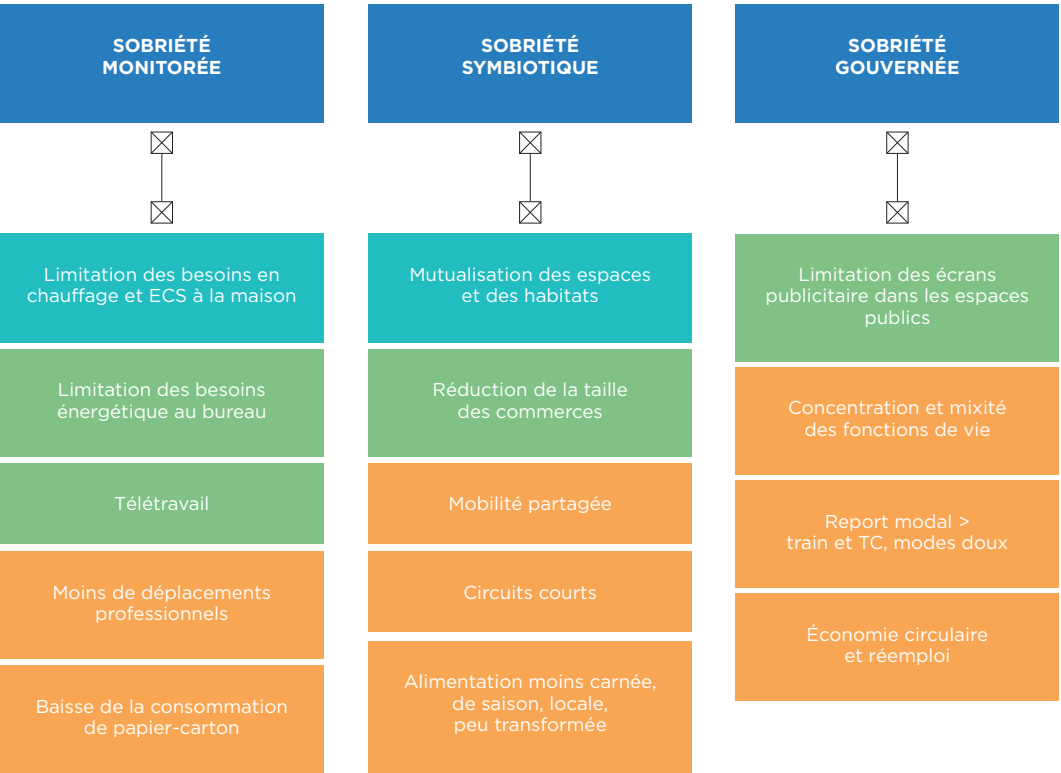


Figure: Gisements de sobriété retenus dans l'exercice « Scénarios 2050 » piloté par RTE, discuté dans le cadre du GT « Dynamiques sociétales » le 7/1/21. Trois modèles types de sobriété sont retenus selon les travaux de recherche de Guérineau et Mayer, 2021 (partenariat de R&D avec RTE)

3.5.5 SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE FUTUR

— Contexte

Deux principaux verrous expliquent l'apport de la R&D dans le domaine de la prospective énergétique :

- La neutralité carbone nécessite une restructuration profonde du système énergétique avec notamment la diminution par deux de la consommation globale d'énergie à l'horizon 2050, et la décarbonation des usages (ils sont aujourd'hui à 70% alimentés en énergies fossiles). La prospective doit ainsi dépasser l'approche tendancielle des usages et le raisonnement en électricité seulement, pour étudier le bouclage énergétique global, en considérant l'ensemble des gisements, vecteurs et usages énergétiques.
- L'analyse technico-économique complétée par les émissions de CO2 ne suffit pas. Dans le contexte général explicité en introduction du programme, il importe d'intégrer les autres dimensions environnementales (ex : biodiversité), les dimensions sociétales (ex : acceptabilité des éoliennes, de la flexibilité, de la sobriété), territoriales (ex : emploi local) et géostratégiques (ex : résilience des chaînes d'approvisionnement).

— Ambition

Mettre RTE en capacité d'analyser l'ensemble du système énergétique européen, afin d'anticiper correctement les futurs possibles du système électrique français.

Besoin de prospective multi-énergie : l'exemple de la mobilité

La mobilité est aujourd'hui quasi-intégralement approvisionnée par des sources d'énergie fossiles. À quelle consommation d'électricité doit-on s'attendre pour la mobilité ? Cela dépend de l'évolution des besoins et comportements (urbanisme, mobilité individuelle versus collective, essor ou stagnation des mobilités douces, etc). Cela dépend des options technologiques (batteries électrochimiques, piles à hydrogène, carburants issus de biomasse). Cela dépend enfin des gisements, notamment celui de la biomasse, très convoité.

— Objectifs

Outils, méthodes et données pour l'analyse énergétique	L'objectif est la capacité d'explorer des bilans énergétiques européens restructurés pour atteindre la neutralité carbone, comme illustré par le diagramme de Sankey (figure), pour lequel chaque flèche est une inconnue à quantifier. Cela nécessite de modéliser les pièces du puzzle: les futurs gisements, vecteurs et usages. En particulier concernant les usages, pour s'affranchir des choix technologiques actuels et faire le lien avec l'évolution des comportements et besoins, il est nécessaire de remonter aux «énergies utiles», c'est-à-dire aux besoins énergétiques finaux (mécaniques, caloriques, etc) par unité de service rendu.
Outils, méthodes et données pour estimer l'empreinte économique, sociale et environnementale du système énergétique: vers des «ACV triples».	Il s'agit d'appliquer les méthodes d'analyse environnementale en cycle de vie au système électrique, et de les compléter par un volet social, notamment concernant l'emploi. Il s'agit aussi, pour anticiper les coûts économiques à long terme, d'en connaître les inducteurs, avec une compréhension détaillée des fabrications, installations et exploitation des composants de systèmes énergétiques.
Modélisation et études du système complet	Il s'agit d'associer les deux axes d'analyse précédents et la simulation technico-économique du fonctionnement du système énergétique (granularité horaire, représentation des aléas, ajustement des capacités installées, utilisation des différents moyens de production, stockages, interconnexions, etc.), en intégrant notamment des indicateurs de résilience du système, par exemple la résistance à des aléas de modes communs, techniques ou organisationnels; ainsi que la dimension locale, en réalisant les analyses à différentes mailles.

— Collaborations

Des collaborations multiples sont réalisées pour appréhender l'ensemble des éléments de cette feuille de route. On peut citer notamment la Chaire Modélisation

pour la Prospective et le Développement Durable pour la modélisation du système, et le CEA pour les modélisations des réseaux de chaleur.

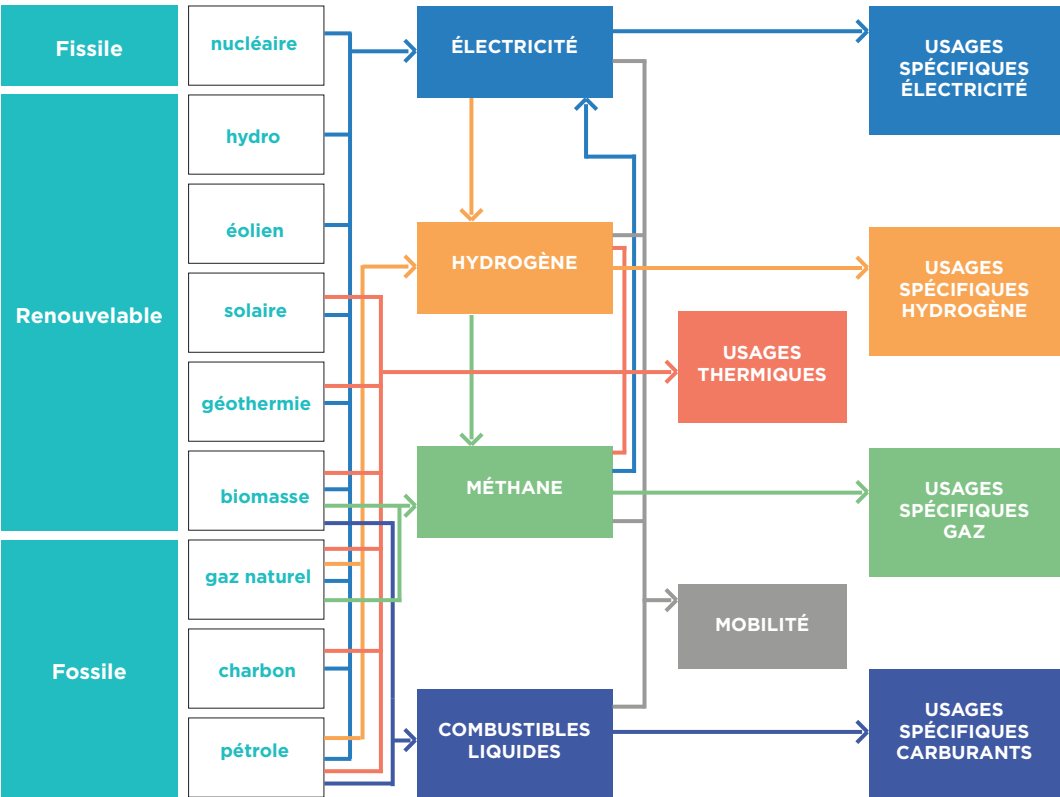


Figure: La modélisation doit permettre d'explorer la restructuration complète du système énergétique, des gisements, vecteurs et usages.

3.6 PROGRAMME CLIMAT, ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE ET RÉSEAU LONG TERME

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, cette architecture étant techniquement et économiquement la plus pertinente pour mutualiser les ressources, et assurer la sûreté du réseau.

La transition énergétique et plus généralement écologique engagée au niveau européen amène des évolutions et des ruptures importantes dans le système électrique : évolution des moyens de production décentralisée, évolution des modes de consommation (flexibilités, véhicules électriques,...), évolution du système énergétique (système multi-énergies), le stockage, une part croissante de l'électricité dans la consommation finale d'énergie... Par ailleurs, l'environnement et la société connaissent de profondes évolutions, dont les processus s'accroissent : disponibilité des ressources, changement climatique, remises en question sociétales des modes de production et consommation, etc. Nous pouvons constater que les évolutions du système électrique ont tendance à accroître la dépendance aux conditions météorologiques. Les effets du changement climatique ont une influence croissante sur certains paramètres (production, consommation) du mix électrique qu'il convient de prendre en compte : vague de froid, canicule, productible hydraulique et éolien... De plus, ces conditions météorologiques ont aussi des impacts sur l'infrastructure de notre réseau : capacité à faire face à des températures extrêmes, inondations, glissements de terrain... Les situations extrêmes jouent donc un rôle clé dans le dimensionnement du système électrique et de notre réseau : les études de dimensionnement doivent pouvoir intégrer les différents scénarios de conditions climatiques, leur fréquence, y compris les événements rares.

Afin de garantir l'adéquation et l'efficacité des investissements futurs, RTE doit anticiper ces mutations pour adapter et revisiter les méthodes et outils actuellement mis en œuvre dans les études prospectives et de développement du réseau (renouvellement, optimisation des équipements existants, construction de nouvelles infrastructures). En effet, ces mutations modifient les stratégies actuelles pour le développement de réseau et offrent de nouvelles perspectives.

L'intégration des nouvelles technologies (ENRs, stockage, Small Modular Reactors...) et le vieillissement du réseau entraînent un besoin très important de nouveau réseau et, au-delà des apports incrémentaux, ouvrent la réflexion sur de nouvelles architectures de réseau.

Quel sera l'impact des réseaux offshore et l'objectif Green Deal de 450 GW de fermes éoliennes offshore en 2050 sur la structure du réseau ? Comment prendre en compte les multi-énergies et les flexibilités dans le développement de réseau ? Quels sont les nouveaux besoins de transport d'électricité ? Quels niveaux de résilience et de fiabilité seront attendus dans le réseau futur ? Quel sera l'impact du changement climatique dans le dimensionnement et l'exploitation du système électrique ?

Dans cette perspective, le programme « Climat, Equilibre Offre-Demande et Réseau long terme » s'articulera autour de trois axes de R&D. Le premier vise à documenter et quantifier les impacts du climat sur le système et les infrastructures électriques français et européen. Le second à développer les modèles et outils pour les études d'équilibre offre-demande et d'investissements réseau de RTE, et ainsi éclairer notamment les décisions publiques en matière de programmation énergétique (BP, SSDR...). Le troisième vise enfin à développer une prospective de l'évolution du réseau, qui croise prospective du système énergétique et offre technologique, afin d'évaluer les différentes architectures possibles de réseau, doter les métiers de méthodes et outils aptes à choisir le développement optimal.



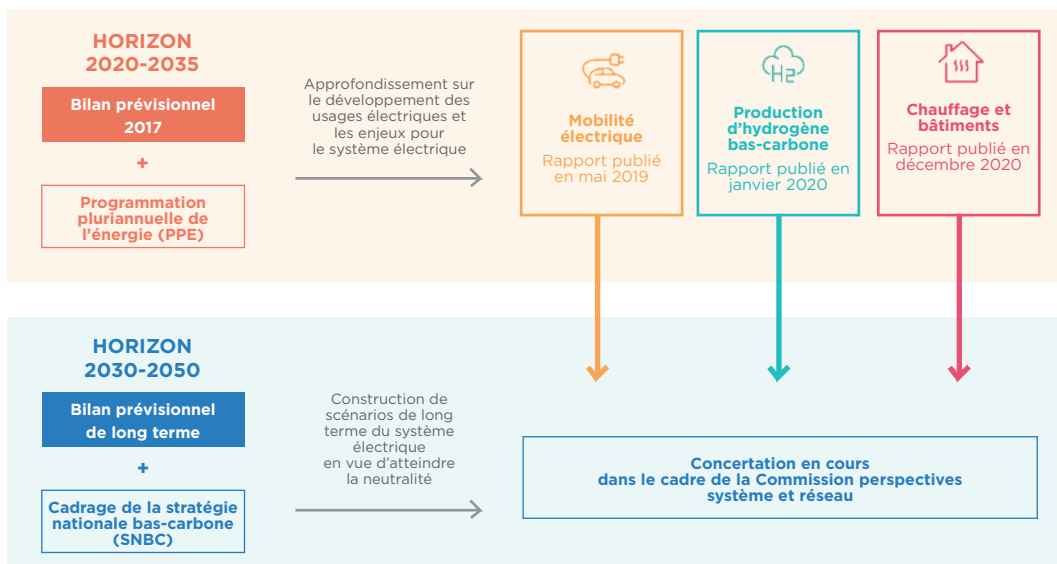


Figure : La R&D adapte les méthodes et outils utilisés dans les études prospectives afin d'éclairer les décisions publiques

3.6.1 CLIMAT, MÉTÉO ET IMPACTS SUR LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE

— Contexte

Les évolutions observées, prévues et prévisibles du système électrique ont tendance à accroître la dépendance aux conditions météorologiques. Les effets du changement climatique auront une influence notable sur certains paramètres du mix électrique qu'il convient de prendre en compte : vague de froid, canicule, productible hydraulique et éolien... RTE est impérativement tenu d'avoir une bonne connaissance des variations météorologiques et de l'évolution à long terme du climat afin de pouvoir intégrer la palette des conditions climatiques et leur fréquence, y compris des événements rares, pour ses activités de supervision de l'**équilibre offre-demande** d'une part, pour la **résilience de ses infrastructures** d'autre part.

Afin de garantir l'adéquation et l'efficacité des investissements futurs, RTE doit comprendre, anticiper et analyser la dépendance de son réseau aux climats actuel et futur pour bien prendre en compte les incertitudes associées.

— Ambition

L'objectif de cette feuille de route est de fournir à RTE les connaissances, méthodes, outils et données pertinents sur le climat actuel et futur, les impacts qui en découlent sur le réseau français et européen et, plus largement, sur l'ensemble du système électrique, dans une démarche de partage la plus large possible au niveau européen, ceci à la fois dans un souci de cohérence (nos réseaux étant interconnectés il nous faut avoir une approche homogène de la résilience) et d'efficacité (si nous avons des besoins similaires pourquoi ne pas mutualiser les efforts).

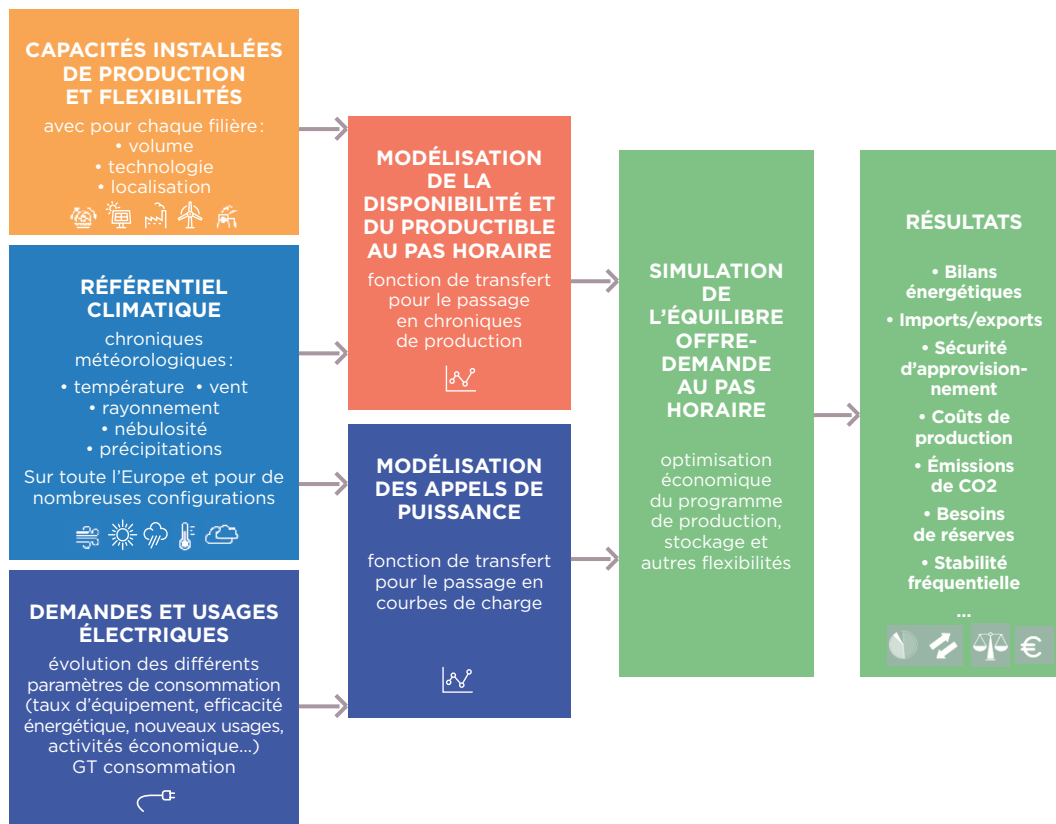


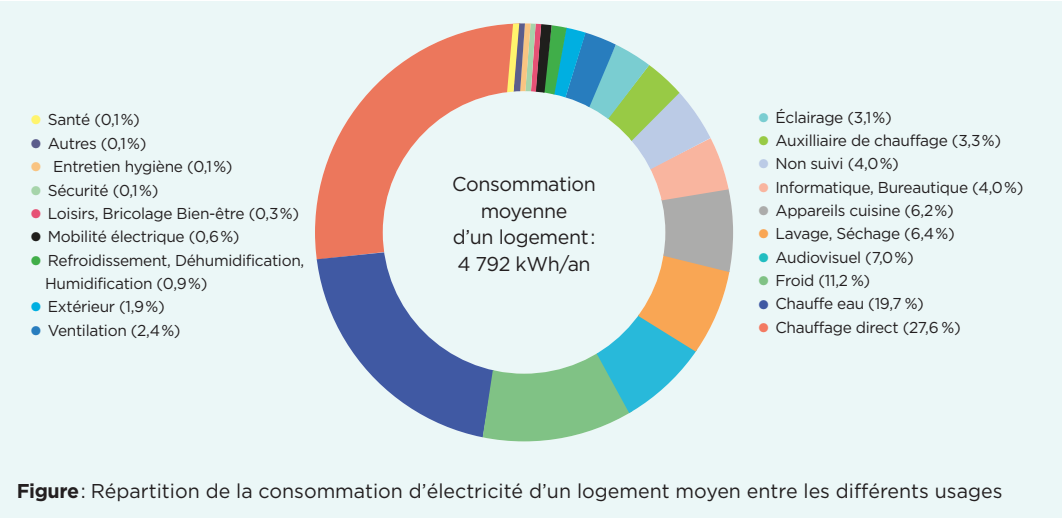
Figure : Principe de simulation de l'équilibre offre-demande utilisant les informations climatiques pour la modélisation de la consommation et des productions renouvelables

— Objectifs

Mise à niveau des bases de données climatiques	Réactualiser les bases de données climatiques et les données dérivées en énergie (fonctions de transfert vers la consommation et les productions renouvelables) pour les porter à l'état de l'art en profitant de l'écosystème européen des services climatiques qui offre des solutions pérennes.
Industrialisation des chroniques de prévisions long terme.	Développer une plateforme de référence interne pour la mise en œuvre des fonctions de transfert et faciliter la mise à disposition des productions et consommations climatiques dans les études long terme internes.
Analyser les impacts du climat sur les infrastructures du réseau	Réduire les impacts du changement climatique sur les infrastructures du réseau en contribuant au projet RESILIENCE d'entreprise et en l'alimentant par les résultats de projets externes.
Prévisions long terme de la consommation	Intégrer les nouvelles problématiques de modélisation de la consommation (électromobilité, multi-énergie, nouvelles flexibilités...) ainsi que de nouvelles approches de modélisations pour les consommations résidentielles et tertiaires (panel Elecdom par exemple).

Cette feuille de route est par nature transverse à différents métiers : R&D elle-même, maintenance, ingénierie, exploitation, prospective en particulier. Elle porte aussi un rôle d'animation transverse : mise en avant de la

thématique de la météo, du climat, et des hypothèses de long terme qui leur sont associées, émergence d'une « communauté climat » au sein de RTE.



— Collaborations

Outre la collaboration historique naturelle avec Météo-France, les objectifs visent une diversification raisonnée vers des partenaires français, dont l'Institut Pierre Simon Laplace pour son ancrage dans la communauté climatique internationale, l'École des Mines pour ses expertises multiples à l'interface météo/climat/énergie,

ainsi qu'une ouverture à l'international (RTE est ainsi récemment devenu membre du World Energy & Meteorology Council) et vise à développer ses relations avec plusieurs partenaires clé du domaine en Europe, notamment via des projets de recherche européen.

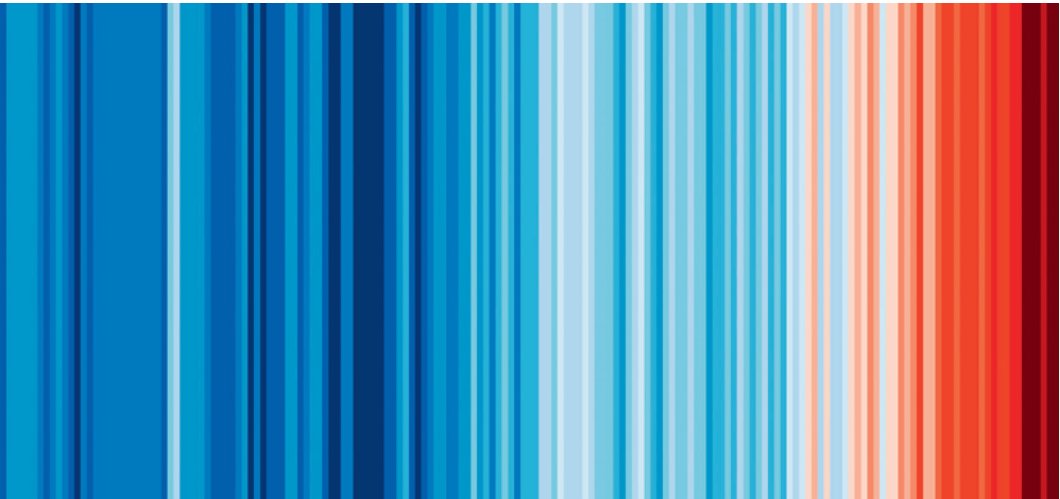


Figure : Températures moyennes en France de 1899 à 2020

3.6.2 ÉVOLUTION DU RÉSEAU

— Contexte

Le système électrique est confronté à de nombreux défis dans une période charnière où RTE doit :

- **s'adapter** à l'évolution du contexte: l'émergence de productions renouvelables largement décentralisées et variables, les nouvelles formes de consommation telles que la mobilité électrique, l'augmentation des interactions avec les autres sources d'énergie, en particulier l'hydrogène, le renforcement prévu d'interconnexions, les opportunités de restructurations et mutualisations à l'occasion du renouvellement des actifs du réseau, les objectifs européens du Green Deal à l'horizon 2050;
- **valoriser** au mieux les différentes solutions structurelles et flexibles à disposition dont l'éventail s'enrichit: des solutions réseaux telles que le Dynamic Line Rating et de nouveaux automates, ainsi que les solutions offertes par les formes de stockage et de pilotage de la demande;
- **décider** des futurs investissements sur le réseau dans un contexte fortement incertain modélisé par des scénarios prospectifs variables.

— Ambition

Face à ces défis, la R&D se mobilise pour accélérer le processus d'amélioration des méthodes, doctrines, outils et données utilisés et traiter les nouvelles problématiques en profondeur, avec une perspective transverse et une approche prospective appuyée par des collaborations de recherche. L'objectif sur la prochaine décennie est que RTE puisse mieux prendre et justifier les décisions possibles sur l'évolution opérationnelle du réseau au service de la transition énergétique en cours : réduction des effets sur l'environnement, résilience et qualité de service attendue à coûts maîtrisés, etc. Ceci nécessitera de modifier notablement certaines pratiques pour s'adapter à un usage des réseaux publics qui évolue fortement avec les ruptures en cours sur le système énergétique et d'anticiper par un travail de prospective l'évolution du réseau dans le cadre des scénarios ouverts par le Bilan Prévisionnel à l'horizon 2050. Les conclusions de ces travaux seront utilisées et synthétisées dans les futurs Schémas Décennaux de Développement du Réseau.

Restructuration de zone

Dans certaines zones d'étude, les chargés d'études font face à une augmentation de la combinatoire des stratégies pour des contraintes patrimoniales ou autre enjeux de gestion des actifs. Se présente alors une opportunité de restructurer en profondeur

la zone. Un prototype a été développé et a été déployé en janvier 2021 afin d'enrichir les analyses des chargés d'études et d'objectiver leurs choix (classification des stratégies les moins chères et affichage des stratégies).

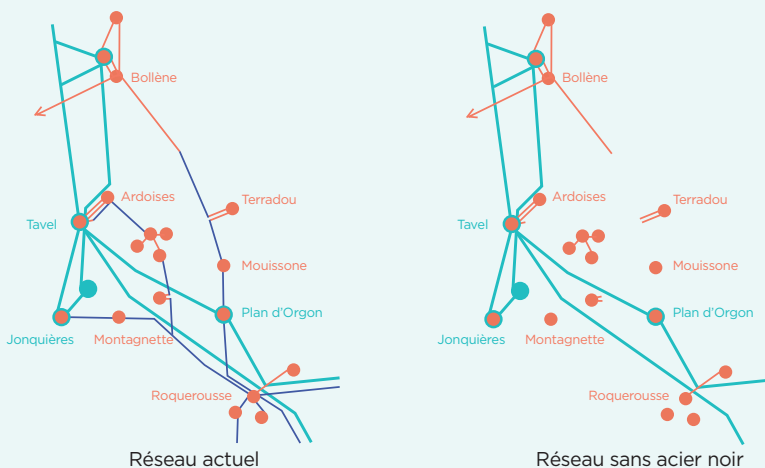


Figure: Exemple de restructuration de zone (ici renouvellement complet acier noir)

— Objectifs

Évolution des processus de décisions avec la gestion des aléas et incertitudes	Lever par des solutions innovantes les difficultés liées à l'application de doctrines et méthodologies en utilisant l'approche multi-situations qui permet de gérer les aléas, et mieux prendre en compte des scénarios prospectifs de plus en plus variables et sujets à incertitude.
Exploration de nouvelles architectures de réseau : du local au global	L'essor de la production renouvelable décentralisée favorise l'émergence de logiques locales dans une volonté de moindre dépendance. L'étude système local-global de la R&D a permis d'étudier la thématique d'échelle d'équilibre du système sans toutefois étudier l'aspect réseau. Dans ce contexte de grande incertitude sur le caractère plus ou moins centralisé du système électrique futur, l'objectif est d'analyser les architectures possibles de réseau en termes d'infrastructures et de coût et de répondre entre autres aux questions suivantes: Quelle utilité d'un réseau de transport dans le scénario «régions équilibrées» en énergie annuelle ou en puissance à une maille plus fine? Quelles options sont envisageables pour l'évacuation de l'éolien offshore de la mer du nord dans le reste de l'Europe?
Modéliser l'exploitation de réseau dans les études de développement de réseau	Le développement des flexibilités amène une évolution de l'exploitation du réseau électrique et fournit de nouvelles opportunités à intégrer dans le développement de réseau afin de trouver le bon équilibre entre solutions flexibles et solutions structurelles.



3.6.3 MODÉLISATION ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE LONG TERME

— Contexte

Étudier l'adéquation entre un parc de production donné et la consommation anticipée, en tenant compte des aléas pouvant intervenir, tant climatiques que propres au système électrique, est indispensable pour tout gestionnaire de réseau afin d'assurer l'approvisionnement électrique (passages saisonniers été/hiver) et éclairer entre autres les décisions publiques en matière de programmation énergétique (BP, SDDR...). Les effets de la transition énergétique et écologique, les nouvelles interconnexions et les réglementations européennes (Clean Energy Package), les progrès des technologies, les changements de mode de vie qui influent sur les usages (flexibilités, réserves, batteries, power-to-X, indicateurs environnementaux...) renforcent la nécessité de réaliser des études probabilistes à moyen et long terme avec des méthodes, modèles et outils à développer.

— Ambition

L'objectif de la feuille de route est de continuer à répondre aux besoins de modèles et d'outils pour les études d'équilibre offre-demande et d'investissements réseau de RTE, de les améliorer et de les pousser vers des développements industriels à disposition de tous. Ce faisant, cette feuille de route vise à continuer à outiller les métiers dans leur démarche de mise en cohérence entre études nationales et européennes, que ce soit des études d'équilibre offre-demande ou d'investissements.

Évolution des bilans énergétiques en France (en TWh)

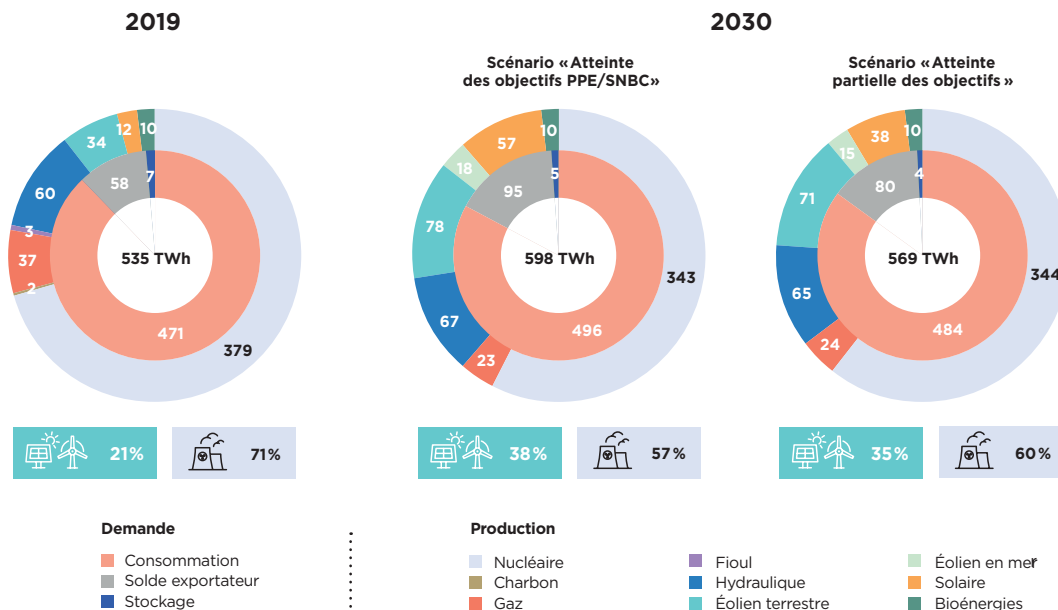


Figure : Évolution des bilans énergétiques en France, évaluation réalisée sur l'outil Antares

— Objectifs

Évolution de la modélisation des actifs du réseau électrique	Répondre aux enjeux de la transition énergétique nécessite de réaliser des études de qualité, de modéliser au plus proche de la réalité les ENR, les groupes thermiques, les batteries et tous les nouveaux ouvrages qui ne sont actuellement pas ou insuffisamment pris en compte dans l'outil Antares (évolution du parc nucléaire, hydraulique, maintenance des groupes thermiques, multi-énergies...).
Enrichir le module d'investissement réseau Antares expansion	Intégrer des concepts innovants d'IA et de machine learning dans les algorithmes d'optimisation des capacités de production et de réseau économiquement optimales.
Réinvestissement dans les modèles pour les études d'équilibre offre-demande; construire un nouvel outil adapté aux évolutions du paysage énergétique	Développer un nouvel outil afin de réaliser des études d'équilibre offre-demande et d'investissements réseau couplant différents vecteurs énergétiques afin de répondre aux évolutions du paysage énergétique national et européen.



3.7 ACTIVITÉS DE R&D TRANSVERSES

Ce programme intègre deux feuilles de route transverses qui ont vocation à alimenter l'ensemble des six programmes fonctionnels présentés précédemment.



3.7.1 NUMÉRIQUE POUR OBSERVER, PRÉDIRE ET DÉCIDER

— Contexte

La question de la «digitalisation» est omniprésente dans nos sociétés développées. Certains affirment que l'information est le nouveau carburant de nos économies (<https://www.economist.com/briefing/2017/05/06/data-is-giving-rise-to-a-new-economy>) et d'autres que la gestion efficace de l'information est peut être la solution pour construire des systèmes plus efficaces et plus résilients¹². En complément, la compréhension de l'impact du numérique sur les systèmes électriques est un sujet essentiel pour la décennie à venir. Deux volets sont à étudier: le premier est «comment le «numérique» change les processus de production et de consommation d'électricité, voire d'énergie?», l'autre étant: «comment pouvons-nous utiliser le numérique pour «mieux»¹³ gérer et développer le système électrique?». Nous aborderons uniquement les questions relatives au cœur de métier de RTE et la question de la «digitalisation» des fonctions supports ne fait pas partie de cette feuille de route.

Notre approche historique a été de construire un système «physique» (des infrastructures) puis d'ajouter des couches de gestion de plus en plus digitales et complexes. Aujourd'hui, la disponibilité de grandes puissances de traitement de calcul et de grandes bandes passantes de communication à des coûts beaucoup plus faibles¹⁴, conduit à un déploiement massif de solutions digitales depuis des solutions embarquées (capteurs intelligents, IoT,...) jusqu'aux Clouds des GAFAs. Ces solutions seront essentielles pour le fonctionnement du système, pour son efficacité mais aussi sa résilience. Il faut repenser le système comme étant un système de systèmes cyber physiques et faire un design conjoint des couches physique et digitale.

Il s'agit de comprendre les différentes facettes de cette «digitalisation» qui vont impacter toute la chaîne de valeur et notre écosystème: depuis l'architecture du système, voire sa gouvernance (local/global, peer2peer, Europe/Pays/Région/Ville/Quartier/...), son développement, sa maintenance et son exploitation. Les impacts négatifs possibles de cette «digitalisation» doivent être aussi analysés dans une perspective «coûts/bénéfices» mais aussi calibrés par des comparaisons à la digitalisation d'autres secteurs: Entertainment, Réseaux Sociaux, e-Commerce, ... Il y a une grande diversité de solutions «digitales» avec des propriétés très différentes. Les questions de souveraineté et de cyber sécurité sont aussi évidemment des dimensions importantes pour un Opérateur d'Infrastructure Vitale.

En regardant la chronologie de l'histoire de la technologie proposée dans l'encyclopédie Britannica (<https://www.britannica.com/story/history-of-technology-timeline>), on peut être frappé par le fait que deux des derniers jalons sont relatifs à la gestion de l'information dans des systèmes complexes: CRISPR-Cas9 pour l'édition des gènes et l'IA avec le succès d'AlphaGo.

Cette tendance va sans doute perdurer et la convergence entre nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives (NBIC) va probablement s'amplifier. Ces domaines vont aussi s'entre fertiliser en partageant des concepts autour de la gestion de l'information. Nous devons comprendre ces tendances et essayer de les infléchir pour en tirer le «meilleur» pour les systèmes électriques, atténuer ou éviter de possibles impacts négatifs.

(12) « Une autre leçon que nous enseigne le vivant consiste en une meilleure gestion de l'information. Dans un écosystème, l'information circule sans cesse et dans tous les sens : à travers les réseaux alimentaires, les hormones et autres vecteurs chimiques, ou encore d'autres formes de communication sensorielles, intentionnelles ou non. L'acacia, lorsqu'il est brouté par des gazelles, produit des phéromones captées par les autres acacias autour, qui vont alors augmenter leur taux de toxines pour repousser le brouteur. T. Chekchak, <http://blog-isige.mines-paristech.fr/2020/05/05/le-bio-mimetisme-outil-de-resilience-locale-face-a-la-crise-sanitaire/> »

(13) La question du « mieux » résonne avec la performance multi critères à définir par ailleurs.

(14) Ces coûts ne reflétant sans doute pas assez beaucoup d'externalités négatives.

— Ambition

Cette feuille de route porte sur l'exploration de solutions numériques et algorithmiques émergentes et plus risquées; elle se positionne de façon transverse aux autres activités de R&D et tout particulièrement sur les sujets nécessitant modélisation et simulation. On distingue plusieurs objectifs :

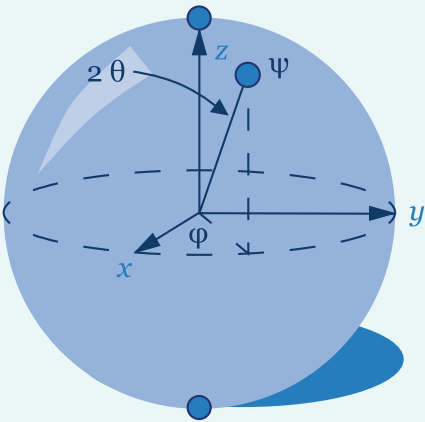
- Le Jumeau Numérique¹⁵: il s'agit de développer des capacités de modélisation et de simulation transverses aux différents métiers. Ce sujet exploratoire pourrait avoir des retombées multiples.
- La veille sur «le numérique et les algorithmes», qui porte sur l'ensemble des couches suivantes: (1) matérielle, (2) communication et architecture, (3) services, (4) langages, (5) algorithmes, et (6) tests/validation/certification.
- Optimisation: cette partie des mathématiques appliquées occupe une place importante dans nos approches numériques. Il s'agit d'orienter et exploiter l'état de l'art pour les besoins d'aide à la décision de RTE.



(15) Le jumeau numérique est une représentation dynamique virtuelle d'un objet, d'un système ou d'un processus du monde réel. Le jumeau numérique utilise les données collectées en temps réel, la simulation et le Machine Learning pour comprendre, anticiper et mieux décider.

Calculateur quantique

Il utilise les propriétés quantiques de la matière, telle que la superposition (une particule de l'infiniment petit peut se trouver dans un état indéterminé avant toute mesure) et l'intrication afin d'effectuer des opérations sur plusieurs états des données en même temps. À la différence d'un ordinateur classique basé sur des transistors qui travaille sur des données binaires (codées sur des bits, valant 0 ou 1), le calculateur quantique travaille sur des qbits dont l'état quantique peut posséder simultanément plusieurs valeurs. Théoriquement, un ordinateur quantique à 4 qbits va calculer 16 fois plus rapidement qu'un ordinateur classique à 4 bits; la puissance d'un ordinateur quantique est doublée à chaque fois qu'un qbit est ajouté!



Objectifs

Feuille de route « Numérique pour Observer, Prédire et Décider »	Jumeau numérique	Avec un ordre et choix des sujets à confirmer : • Prototypage d'une architecture de jumeau numérique, • Étude sur résilience canicule, • ACV des choix de gestion d'actifs, • Objectivation du besoin de ressources global RTE pour le TURPE7.
	Optimisation	• Intégrer les meilleurs outils: «modeleur» jouant le rôle d'aiguillage vers les solveurs commerciaux et open-source. • Développer un prototype simulant l'intrication forte entre EOD et le réseau avec modélisation et prise en compte des incertitudes, des parades et automates. • Communauté optimisation de RTE: formations, aide à la modélisation, appui aux projets. • Orienter la recherche scientifique par des thèses et challenges.
	Numérique et algorithmes	• Veille « passive »: suivre le milieu académique; • Veille « active »: orienter le milieu académique sur de nouvelles classes de problèmes ou d'applications; • Veille « pro-active »: s'investir dans la recherche sur des cas concrets pour des applications identifiées. Il s'agit ici de « Preuve de Concept » sans être sur le chemin critique d'un projet de R&D orienté plus « enjeu métier »; nous sommes donc ici dans une approche plutôt techno-push.
	IA	Orienter la recherche scientifique par des thèses et challenges sur les enjeux du système électrique.



3.7.2 OPEN R&D

— Contexte

Les objectifs de transformation portés par le projet CAP R&D ne pourront être atteints qu'au moyen de coopérations accrues avec un écosystème de partenaires élargi. Compte-tenu de la diversité des activités à mener, des complexités et incertitudes que chacune d'elles comporte, il sera en effet essentiel de mutualiser les ressources avec d'autres parties prenantes, de gagner du temps en réutilisant et en partageant les résultats et de fédérer des compétences multiples que RTE ne peut constituer isolément. La feuille de route « Open R&D » a pour objectif de répondre à cet enjeu

en concevant et en instaurant des modalités de fonctionnement et cadres de gouvernance innovants, performants et attractifs pour développer les collaborations multipartites nécessaires aux différents projets.

Cette feuille de route s'inscrit dans le prolongement des activités de normalisation, de développement de collaborations et d'ouverture menées les années précédentes. Elle s'inspire par exemple de la démarche open source initiée en 2018 qui a notamment abouti à la création de LF Energy, une fondation open source créée en partenariat avec The Linux Foundation et consacrée aux besoins des systèmes électriques et aux enjeux de transition énergétique.



Figure : Fin août 2021, la fondation LF Energy, créée à l'initiative de RTE et consacrée aux besoins des systèmes électriques et aux enjeux de transition énergétique, rassemble 44 membres et héberge 12 projets (www.lfenergy.org)

— Ambition

Les nouveaux modes de collaboration à imaginer devront idéalement permettre :

- une mutualisation maximale des ressources avec d'autres parties prenantes ;
- des opportunités accrues de réutilisation de résultats externes en contrepartie d'une diffusion accrue des résultats obtenus par RTE ;
- l'attraction de partenaires performants et innovants, partageant des besoins communs et apportant des compétences complémentaires ;
- la mise en place fluide des cadres de gouvernance nécessaires aux collaborations, évitant les longs délais de négociation et contractualisation souvent constatés ;
- une coordination accrue avec l'écosystème contribuant à améliorer l'interopérabilité et l'intégration au-delà des frontières de l'entreprise ;
- une dynamique d'innovation accrue, bénéfique à la performance de RTE et des autres parties prenantes de l'écosystème (entreprises ou institutions françaises, européennes, mondiales en interaction avec RTE) ;
- une atténuation des risques inhérents aux processus d'innovation découlant du partage d'expérience, d'une diversification des points de vue et d'une mutualisation des efforts ;
- une meilleure sobriété découlant du partage et de la réutilisation ;
- une meilleure résilience en évitant les enfermements dans des cadres de collaboration fermés.

Pour répondre à ces ambitions, les champs couverts par la feuille de route « Open R&D » sont :

- la normalisation ;
- l'open source pour le développement logiciel ;
- le développement de collaborations et consortiums et l'innovation ouverte ;
- l'open data au service des activités de R&D ;
- l'adhésion et la participation aux sociétés savantes.

— Objectifs

Normalisation	Les principaux objectifs de l'activité de normalisation sont : • d'intégrer tout ou partie des travaux de R&D et exigences de RTE dans les référentiel techniques de normalisation, • de disposer en temps et en heure des normes nécessaires aux cahiers des charges des futurs déploiements industriels de RTE, • de maintenir un dialogue technique riche avec nos fournisseurs. Deux grands chantiers normatifs sont à construire en priorité : • la digitalisation, • l'environnement.
Construction d'un écosystème de partenaires pour le co-développement de logiciels en open source	Cette activité vise le développement d'un écosystème de partenaires impliqués, productifs et pertinents, notamment autour de la fondation LF Energy créée à l'initiative de RTE. Elle implique aussi l'accompagnement de projets logiciels à fort enjeu industriel afin d'identifier les opportunités de collaborations open source et les mettre en œuvre le cas échéant.
Identification, expérimentation et validation de nouveaux modes d'organisation des activités logicielles pour les collaborations open source	Cette activité comprend : • l'animation interne, la pédagogie à tous les niveaux de l'entreprise, le partage des bonnes pratiques, l'analyse des retours d'expérience; • la transformation des activités de développement logiciel internes incluant l'adaptation des compétences requises, des cursus de formation, des processus d'achat logiciel, et l'identification et l'expérimentation des nouveaux outillages requis.
Rapprochement de la normalisation avec l'open source	L'objectif visé est d'aboutir à une influence accrue sur les normes avec un effort moindre en s'appuyant sur des collaborations open source. Réciproquement, il s'agira de permettre aux projets open source de gagner du temps et des ressources en s'appuyant sur les travaux de normalisation.
Collaborations et Innovation ouverte	L'activité a pour premier objectif d'accompagner les projets menés par la R&D de RTE pour identifier, construire et faire fonctionner des collaborations. Elle a également pour ambition de concevoir et d'expérimenter de nouveaux modèles de collaboration fondés sur l'innovation ouverte.
Open Data	L'objectif est d'identifier les domaines pour lesquels une démarche d'open data serait propice au développement de collaborations de R&D et à l'innovation ouverte, puis d'élaborer les modalités, en associant le cas échéant les autres parties prenantes.

— Collaborations

Les actions de développement de collaborations se focaliseront sur :

- l'élargissement de l'écosystème impliqué dans LF Energy et plus particulièrement dans les projets logiciels intéressant RTE;
- la mise en place et la consolidation de cadres de collaboration avec les GRD (Gestionnaire de Réseau de Distribution) / (en France, à l'image de la collaboration STAR¹⁶ avec Enedis, et en Europe, par exemple en lien avec des projets LF Energy);
- et plus généralement, l'appui aux autres feuilles de route de Cap R&D pour l'organisation de collaborations et d'innovation ouverte.



(16) Le projet STAR, basé sur la technologie blockchain, a pour but de faciliter la mise en œuvre des flexibilités des centrales de production renouvelable, en automatisant et fiabilisant le traitement et la traçabilité des informations sur l'ensemble de la chaîne allant de la prise en compte des conditions de flexibilité jusqu'à la valorisation de leur exécution.



Photos:

Ailiers (page 8), RTE / Ham & Juice (page 12), RTE / La Cen /
Ham & Juice (page 13), Philippe Quaisse (page 26),
Nicholas Doherty (page 62), Margot Raymond (page 66),
Shebam (page 73).



Le réseau
de transport
d'électricité

Immeuble Window
7C, place du Dôme
92073 Paris - la Défense Cedex
www.rte-france.com