

RAPPORT DE SYNTHÈSE

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



**LE POUVOIR DE
L'INTELLIGENCE
COLLECTIVE**

JUIN / 2018
LES CAHIERS FUTURIS

Groupe de travail sur les réseaux électriques
présidé par Olivier Appert et Denis Randet

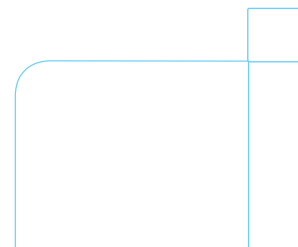
Les travaux menés par FutuRIS-ANRT reçoivent
le soutien des institutions et entreprises suivantes :

AIR LIQUIDE, ANR, ATOS, AXA, BERGER-LEVRAULT, BOUYGUES, BRGM,
CAISSE DES DEPÔTS, CEA, CNRS, CPU, CURIF, FRAMATOME, GENERAL ELECTRIC, INSTITUT
MINES TELECOM, INSTITUT PASTEUR, INRIA, INSERM, MESRI , NOKIA-ALCATEL, ORANGE,
RENAULT, SAFRAN, SERVIER, SNCF, THALES, TOTAL.



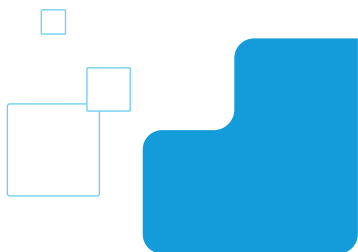
Le contenu n'engage que la responsabilité de l'ANRT en tant qu'auteur et non celle
des institutions qui lui apportent leur soutien.

Liste des personnes impliquées dans le groupe de travail



Michel ALBERT
Sophie AVRIL
Julien BARRETEAU
Philippe BOURGUIGNON
Aurélie BRINGER
Hélène BURLET
Alain BURTIN
Julien CALLEC
Christian CAVATA
Nicolas CLAUSSET
Jean-Guy DEVEZEAUX
Guillaume GAZAIGNES
Patrice GEOFFRON
Nouredine HADJSAID
Claude HELLER
Yannick JACQUEMART
Maïté JAURÉGUY
Lionel JODET
Fantine LEFEVRE
Marie-Catherine LEJARD
Paul LUCCHESI
Pierre MALLET
Vincent MAZAURIC
Jean-François MINSTER
François MOISAN
Xavier MONTAGNE
Isabelle MORETTI
Frédéric RAVEL
Martin REGNIER
Vincent SAUBESTRE
Vera SILVA
Abdelilah SLAOUI
Jean SONNET
Pierre SORLIER
Hubert TARDIEU
Anne VARET
Michel VIKTOROVITCH

ENEDIS
ANCRE
MTES
ENGIE
POLE CAPENERGIES
ANCRE (CEA/DRT/LITEN)
EDF
EDF
CEA
MTES
ANCRE (CEA/DAS/I-TESE)
SNCF
DAUPHINE
ANCRE (CNRS)
AIR LIQUIDE
RTE
RTE
SGPI
ADEME
MINISTERE DE L'INDUSTRIE
POLE CAPENERGIES
ENEDIS
SCHNEIDER ELECTRIC
ACADEMIE DES TECHNOLOGIES
ADEME
MESRI
ENGIE
MESRI
ADEME
TOTAL
EDF
CNRS
VINCI
MINISTERE DE L'INDUSTRIE
ATOS
ADEME
MTES



SOMMAIRE

PROPOS INTRODUCTIF

7

PARTIE 01 / LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE AUJOURD'HUI ET SES ÉVOLUTIONS

9

1. Une relative stabilité de la consommation, des évolutions en cours et à venir 9
2. Une production marquée par une intégration croissante d'énergies renouvelables variables 9
 - a. Un mix électrique intégrant un taux croissant d'EnR 9
 - b. Une augmentation de la production raccordée sur le réseau de distribution 10
 - c. Des besoins de prévisibilité 10
 - d. Le rôle des interconnexions 10

PARTIE 02 / LES ADAPTATIONS NÉCESSAIRES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE POUR FAIRE FACE À CES ÉVOLUTIONS

11

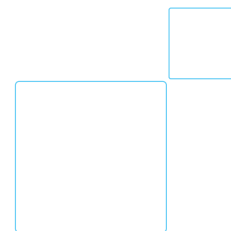
1. La stabilité du réseau et son pilotage 11
2. Un réseau de demain intégrant plus d'électronique et moins de machines tournantes 12
3. Un besoin croissant de régulation au niveau local 12
4. Une augmentation des besoins de flexibilité 13
 - a. Les besoins de flexibilité 13
 - b. Des solutions historiques et de nouvelles solutions de flexibilité 13
 - c. Les nouveaux usages : numérique, véhicules électriques et autoconsommation 14
5. Le Numérique, l'utilisation des données et la cyber-sécurité 15
 - a. L'intégration du numérique 15
 - b. La cyber-sécurité 16
 - c. Modèles économiques & modèles d'affaires 17

PARTIE 03 / LES PRIORITÉS DE R&D ET LES ALERTES

19

1. La stabilité et le pilotage du réseau 19
2. L'électronique de puissance 20
3. Le stockage et les moyens de flexibilité 20
4. L'utilisation des données 20
5. La cyber sécurité 21
6. Les modèles économiques 21

PROPOS INTRODUCTIF



Ce travail intervient dans le prolongement de celui effectué par l'ANRT fin 2016, associant entreprises et établissements publics, lors de la publication de la Stratégie Nationale de la Recherche Énergétique (SNRE). Les conclusions de ce premier travail insistaient sur la nécessité de viser un marché mondial, de distinguer les niveaux de maturité et de ne pas mélanger les TRL, de distinguer clairement un démonstrateur et une recherche exploratoire, de tenir compte de la contribution croissante des PME et des start-up, de renforcer les capacités d'analyse collective et d'intégrer pleinement les apports de la révolution numérique.

Ce nouveau groupe de travail, associant lui aussi entreprises, institutions de recherche et pouvoirs publics, s'intéresse à la mise en œuvre de la SNRE sur un thème précis, celui des réseaux électriques. En effet, avec l'arrivée des sources d'énergies variables (notamment l'éolien et le solaire photovoltaïque), la problématique des réseaux constitue un défi à la fois technologique, économique et réglementaire. Il s'agit d'une thématique transverse dont le périmètre est bien délimité. De plus, ce travail est complémentaire avec celui du comité prospectif de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) traitant également des réseaux, dont l'objectif porte sur les business models et la régulation.

Une transition énergétique est engagée en France et dans de nombreux pays européens. L'Union européenne s'est fixé des objectifs ambitieux pour 2030. Les éléments clés du paquet Énergie-Climat, présenté en janvier 2014, sont : une réduction des

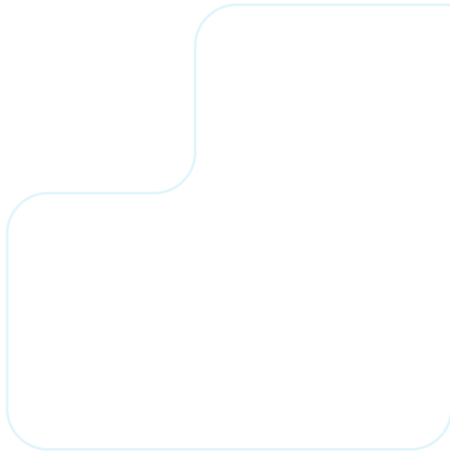
émissions de gaz à effet de serre de 40 % par rapport au niveau de 1990, une part d'énergies renouvelables à 27 % de la consommation énergétique et une amélioration de l'efficacité énergétique d'au moins 27 % (par rapport à la tendance actuelle). Ces objectifs doivent être déclinés par les États membres dans leurs plans d'actions.

En France, la loi TECV de juillet 2015 définit des objectifs d'évolution du mix de production, de maîtrise de la consommation et de transferts d'usages vers l'électricité. En 2030, les énergies renouvelables devraient représenter 40 % de la production d'électricité.

Variable et décentralisée, la production d'électricité d'origine éolienne et photovoltaïque, associée à l'évolution des modes de consommation (développement de la mobilité électrique, de l'autoconsommation, ...), pose un certain nombre de questions techniques, économiques, sociétales, comportementales, politiques et réglementaires. Ces différents aspects seront abordés dans les parties 1 et 2. La partie 3 propose, en s'appuyant sur les travaux du groupe de travail, une série d'alertes et de recommandations relatives aux questions de R&D.

Notre approche s'appuie notamment sur le travail d'identification des axes prioritaires de recherche effectué au niveau européen dans le cadre de l'ENTSOE¹ : elle en reprend la structuration tout en tenant compte des spécificités françaises.

1- http://riroadmap.entsoe.eu/wp-content/uploads/2016/06/entsoe_ri_roadmap_2017-2026.pdf



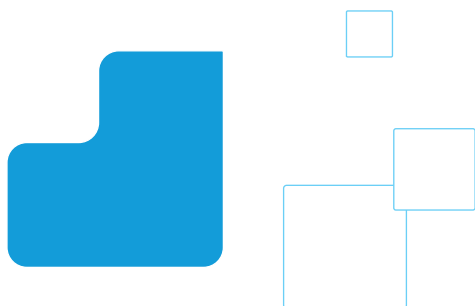
1.

**UNE RELATIVE STABILITÉ
DE LA CONSOMMATION,
DES ÉVOLUTIONS EN COURS
ET À VENIR**

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

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

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



2.

**UNE PRODUCTION MARQUÉE
PAR UNE INTÉGRATION
CROISSANTE D'ÉNERGIES
RENOUVELABLES VARIABLES****a. Un mix électrique intégrant
un taux croissant d'EnR**

Plus de la moitié des nouvelles installations de production d'électricité aujourd'hui construites en Europe sont à énergie renouvelable. Toutefois, malgré une puissance installée considérable³ leur contribution moyenne en énergie reste globalement faible dans le mix électrique européen par rapport aux moyens conventionnels (nucléaire, hydraulique, thermique, ...) et de fortes disparités existent entre les pays européens⁴.

Les scénarios d'évolution du mix énergétique français sont très contrastés : par exemple, ceux proposés par RTE à l'horizon 2035 dans son Bilan Prévisionnel 2017 prévoient une proportion d'électricité issue d'énergies renouvelables comprise entre 40 % (scénario VOLT) et 71% (scénario WATT), incluant éolien, photovoltaïque et hydraulique. Cette progression est principalement le fait de l'éolien (production multipliée par trois à cinq en fonction des trajectoires) et du photovoltaïque (multiplication par un facteur cinq à sept).

Certains points saillants sont communs à tous ces scénarios, notamment l'augmentation de la variabilité de la consommation résiduelle du fait de l'augmentation notable des capacités de production d'EnR et de la baisse de la part des productions nucléaire et thermique.

2- Demande résiduelle = consommation - production fatale

3- La capacité installée en éolien et PV de l'Allemagne avec plus de 100 GW en 2018.

4- L'éolien représente 10 % du mix électrique européen en 2017, le PV 3 %.

b. Une augmentation de la production raccordée sur le réseau de distribution

L'essentiel des installations renouvelables est, et sera, raccordé au réseau de distribution.

Fin 2017, 380 000 installations renouvelables sont raccordées sur le réseau de distribution, pour une puissance d'environ 18 GW (11,7 GW d'éolien et 6,5 GW de PV), avec un rythme soutenu de nouvelles installations.

Les installations éoliennes sont majoritairement des grandes installations⁵ : au 31 décembre 2017, 57% des installations éoliennes ont une puissance supérieure à 8MW et représentent plus de 80% de la puissance éolienne totale installée.

Les installations photovoltaïques sont majoritairement de petites installations⁶, raccordées au réseau de distribution : au 31 décembre 2017, 72% des installations PV ont une puissance inférieure à 3kW (et représentent 9% de la puissance totale) et moins de 0,4% des installations PV ont une puissance supérieure à 250kW (et représentent 52% de la puissance totale).

La multiplication de ces nouvelles installations aura des impacts importants sur les réseaux électriques de transport et de distribution et pourrait nécessiter des profondes évolutions de leur structure et de leur exploitation afin de continuer à garantir stabilité, fiabilité, sécurité d'approvisionnement et sûreté de l'exploitation.

c. Des besoins de prévisibilité

Le développement du solaire et de l'éolien rend l'équilibrage entre offre et demande plus complexe. En effet, la production dépend directement des conditions météorologiques (conditions d'ensoleillement et cycle jour/nuit pour le PV et conditions de vent pour l'éolien). Dans le cas de la production éolienne, les erreurs de prévision à J+1 sont assez faibles, toutefois, des erreurs plus importantes peuvent arriver quelques fois par an. La production photovoltaïque est plus difficilement prévisible, notamment à maille fine, en raison notamment de la difficulté à prévoir la formation des nuages et leur position précise.

Le couplage des prévisions météorologiques avec le pilotage du réseau constitue une nécessité pour la gestion du système électrique au plus proche du temps.

- Les responsables d'équilibre sont notamment appelés à combiner la prévision de la consommation et celle de la production, en s'approchant le plus possible du temps réel afin de maîtriser les écarts sur leurs périmètres d'équilibre.
- La qualité des prévisions à l'horizon journalier et infra-journalier conditionne le dimensionnement des leviers de flexibilité nécessaires aux opérateurs de réseaux de transport et de distribution pour assurer le bon fonctionnement du système électrique.

L'amélioration de la modélisation des phénomènes météo-climatiques et la qualité et de la précision des modèles de prévision météo (notamment à maille fine) est importante dans un contexte d'exposition croissante du système électrique aux aléas climatiques.

d. Le rôle des interconnexions

Au-delà du renforcement du réseau et des échanges d'électricité, les interconnexions permettent de bénéficier du foisonnement résultant des différences de conditions météorologiques entre pays européens. Il constitue un atout, exploité par les gestionnaires de réseaux, ainsi que par les acteurs du marché de gros de l'électricité en Europe, dans un contexte de couplage croissant des marchés de l'électricité. Cependant, l'opinion n'est pas favorable à l'ouverture de nouvelles lignes à haute tension, les délais de construction sont extrêmement longs et le foisonnement à l'échelle continentale n'est pas toujours vérifié.

5- <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/80>
6- <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/79>

02 LES ADAPTATIONS NÉCESSAIRES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE POUR FAIRE FACE À CES ÉVOLUTIONS

1.

LA STABILITÉ DU RÉSEAU ET SON PILOTAGE

La stabilité du réseau est essentielle. En régime stationnaire, il s'agit d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande. En régime transitoire (par exemple suite à une forte perturbation), il s'agit de retrouver rapidement l'équilibre et d'éviter le blackout.

Actuellement, la fréquence est la base de l'exploitation du réseau électrique européen, où la France et l'Allemagne occupent une situation géographique privilégiée, au sein de la zone UCTE⁷. La stabilité du réseau repose aujourd'hui sur son auto-capacité à maintenir le synchronisme. Si un déséquilibre local se produit, il est instantanément compensé par les réserves constituées sur l'ensemble des moyens de la zone interconnectée, qui rétablissent l'équilibre production-consommation, et la fréquence. Plus le réseau est grand, plus l'énergie cinétique globale est importante, plus le système est en capacité de corriger des fluctuations de charge, plus on mutualise cette fonction de régulation et plus il est sûr : c'est la tendance qui a prévalu jusqu'à présent dans le développement des réseaux.

Mais contrairement aux installations de production conventionnelles (centrales thermiques, nucléaires ou fossile à gaz ou charbon, grosse hydroélectricité...), les énergies renouvelables variables (PV, éolien, ...) participent peu⁸, voire pas du tout, aux énergies magnétique et cinétique : leur introduction peut fragiliser les conditions d'opération des systèmes électriques si elles ne sont pas compensées, par exemple par d'autres composants ou de nouvelles topologies de réseau (μ -grids). Plus le taux de pénétration de

l'électronique de puissance est important, moins le système comporte d'énergie cinétique et plus la baisse de la fréquence sera rapide en cas d'incident : on risque d'atteindre le seuil critique (délestage des charges) avant activation des systèmes de défense. Le développement de réglage primaire de fréquence plus rapide (par exemple avec des batteries) vise à limiter la chute de fréquence pendant les premiers instants de défaut.

C'est pourquoi des travaux actuels cherchent à procurer une inertie synthétique (automatismes permettent de constituer une inertie artificielle, dite inertie synthétique, afin de contribuer à l'inertie globale du réseau⁹) au système électrique grâce à des onduleurs «Grid-supporting». De plus, le «Grid-forming» consiste à injecter de l'énergie cinétique synthétique supplémentaire (par exemple à partir de batteries ou de lignes DC) pour limiter la chute de fréquence initiale pendant les premiers instants de défaut. Ceci doit encore faire l'objet de R&D. Des travaux complémentaires devront permettre d'évaluer les besoins d'inertie puis de réserve du système électrique, par exemple les réserves nécessaires et les seuils limites de production synchrone. Il s'agit d'évaluer le dimensionnement du stockage (capacité totale de stockage à installer), la dissémination de ces réserves (répartition géographique) mais également d'optimiser le contrôle du système de stockage (gestion d'énergie).

Une solution mécanique facilement accessible est d'utiliser des compensateurs synchrones (volant d'inertie ou alternateur de centrale thermique découplé du générateur de vapeur) pour maintenir l'énergie cinétique du système électrique.

7- Union de Coordination pour le Transport d'Électricité (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity). Association regroupant les gestionnaires des réseaux de transport européens interconnectés. Comprend une zone géographique allant du Portugal à la Roumanie en passant par la Suisse. Cette zone est continentale, et ne comprend pas la Grande-Bretagne ni les pays nordiques (Suède, Norvège et Finlande).

8- L'énergie cinétique des éoliennes n'est pas utilisable car la fréquence n'est pas calée avec celle du réseau électrique.

9- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00778698/document>

2.

UN RÉSEAU DE DEMAIN INTÉGRANT PLUS D'ÉLECTRONIQUE ET MOINS DE MACHINES TOURNANTES

Comment faire fonctionner un réseau électrique dans lequel il y a potentiellement un taux très élevé d'EnR variables avec davantage d'électronique et moins de machines tournantes, sachant que la proportion instantanée d'EnR variables peut-être beaucoup plus forte que la proportion moyenne en énergie dans le mix et que l'énergie cinétique du système électrique est susceptible de varier en fonction de la production des ENR variables et de la proportion de machines tournantes couplées au réseau à chaque instant ?

Du fait du raccordement des ENR via de l'électronique de puissance et du changement de la nature d'équipements sur le réseau, on fait face à un problème plus global de comportement électrique et de pilotage du système : on va vers plus d'électronique et de numérique et moins d'électromécanique et d'électrotechnique (générateurs et moteurs tournants). Le comportement électrique de la production change mais aussi celui de la charge. De plus, le plan de protection des personnes et des équipements devra être adapté.

Les réseaux se complexifient et les architectures électriques deviennent plus flexibles. La gestion des situations critiques dans ce contexte fortement variable nécessite donc une forte adaptation des protections, via de l'électronique de puissance.

Une attention particulière devra notamment être portée aux composants nécessaires à la chaîne de coupure (protection, relais et disjoncteurs), aux interactions AC/DC et à la transformation DC.

Enfin, la digitalisation des systèmes électriques pourrait permettre de soutenir à grande échelle l'émergence industrielle des composants «grand gap»¹⁰ (SiC, AsGa...) dont les performances apportent des solutions techniques pertinentes (fronts de commutation plus raides permettent une moindre dissipation, température de jonction plus élevée, fréquence de hachage plus élevée et/ou une plus grande compacité, ...).

10- Composants de puissance dont les performances attendues sont prometteuses, notamment : une vitesse de commutation élevée, une tenue en tension importante et une augmentation des fréquences de découpage - <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01065200/document>

3.

UN BESOIN CROISSANT DE RÉGULATION AU NIVEAU LOCAL

Aujourd'hui l'équilibre du réseau interconnecté européen est géré par les gestionnaires de réseaux de transport (GRT) avec des zones de réglages à des mailles nationales ou régionales. A l'avenir, et afin de mieux prendre en compte le développement de l'autoconsommation et la décentralisation de la production connectée aux réseaux des distributeurs, le rôle des distributeurs est appelé à évoluer vers un rôle de gestionnaire de réseau de distribution (GRD) en coordination avec le rôle joué par les gestionnaires de réseaux de transport (GRT), dans le cadre d'une gestion de l'équilibre offre-demande qui restera global à la maille du système électrique. L'articulation des responsabilités et des rôles des GRT et GRD fait l'objet de réflexions et travaux en cours dans le contexte européen.

La mise en place d'une coordination locale/nationale est nécessaire : avec la forte émergence d'une gestion énergétique à la maille locale, liée notamment au développement de la production décentralisée, de l'autoconsommation et de l'électromobilité, les réseaux de distribution ne peuvent plus être considérés, du point de vue du réseau de transport, comme une «simple» charge agrégée. Les actions au niveau local peuvent avoir des impacts au niveau global et vice versa. Cela peut aller jusqu'à la plaque continentale. Il est donc de plus en plus indispensable de coordonner le local avec le national dans un contexte de partition des responsabilités. Dans ce contexte, la question de l'observabilité est un élément clef.

La résilience du réseau électrique après un incident majeur est également une problématique importante. Avec l'introduction de plus en plus de numérique, de productions décentralisées, l'existence de boucles locales ou encore le développement de l'autoconsommation, le schéma habituel de reconstitution du fonctionnement du réseau n'est plus adapté et doit être repensé.

Identifier les synergies possibles entre l'ensemble des réseaux d'énergie (électricité, gaz naturel,

chaleur & froid, ...) offre des solutions de flexibilité et pourrait permettre d'améliorer la fiabilité de l'approvisionnement en énergie. Il faut tirer parti, au niveau local, des complémentarités entre ces différents vecteurs énergétiques. Des modélisations des réseaux d'énergies, électrique mais leur couplage aux réseaux de gaz et de chaleur, sont nécessaires.

Les Zones non-interconnectées (ZNI) et les territoires insulaires ont la particularité de former de « petits systèmes isolés » ne bénéficiant pas, ou peu, d'interconnexion à un réseau électrique extérieur. Ce sont de véritables terrains d'expérimentation qui permettent, en relâchant certaines contraintes (notamment le coût) de tester des solutions et des technologies. En effet, le prix élevé de l'électricité dans les ZNI favorise la rentabilité des solutions nouvelles.

Ces développements pourraient ensuite être déployés, y compris à l'international.

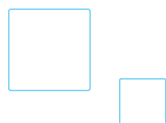
4.

UNE AUGMENTATION DES BESOINS DE FLEXIBILITÉ

a. Les besoins de flexibilité

Avec l'augmentation du taux de pénétration des EnR variables, le réseau électrique devra demain s'appuyer sur une offre de flexibilité plus importante. Il s'agira notamment de gérer les pointes de consommation, d'accompagner la modulation des EnR variables (horaire, journalière ou hebdomadaire), d'équilibrer offre et demande au plus proche du temps réel. Le Bilan Prévisionnel 2017 de RTE¹¹ anticipe sur ce point un quasi doublement des besoins de flexibilité à horizon 2035 dans ces différents scénarios.

Les dimensions géographique et temporelle de ce besoin de flexibilité doivent être prises en compte. Ainsi, le pas de temps de cette flexibilité est un élément essentiel afin de distinguer les besoins de l'ordre de la seconde, de la minute ou de l'heure.



11- <https://www.rte-france.com/fr/article/bilan-previsionnel>

12- À partir d'un certain taux de pénétration en énergie dans les petits systèmes électriques insulaires c'est déjà un levier nécessaire à la sûreté d'exploitation des systèmes électriques

b. Des solutions historiques et nouvelles solutions de flexibilité

Trois voies principales permettent de répondre à ces besoins de flexibilité :

- **la modulation des sources de production.**
- **les capacités d'effacement de la consommation, qu'elle soit industrielle, tertiaire ou résidentielle, dont celles induites par une modification des usages. Elles constituent des solutions de flexibilité, tirées notamment par les besoins de capacité de pointe.**
- **le stockage/déstockage.**

La gestion de la charge de façon plus générale constitue également un levier de flexibilité pour la gestion de l'équilibre offre-demande (tarifs heures pleines / heure creuse associé à l'usage eau chaude sanitaire, ...), demain recharge intelligente des véhicules électriques ...

La modulation de la production, notamment nucléaire, est bien maîtrisée aujourd'hui et consiste à agir sur les modes d'exploitation. Ce fonctionnement en mode « suivi de charge », spécifique au parc nucléaire français, permet de programmer 2 baisses par jour pouvant aller jusqu'à 80% de la puissance nominale en 30 minutes environ. Cependant le fonctionnement à bas régime ne peut pas durer et il est nécessaire de remonter la puissance ou d'arrêter le réacteur.

La capacité à piloter les installations ENR variables pour contribuer à la gestion de l'équilibre offre-demande constituera un levier essentiel dans la perspective d'intégration de taux élevés d'ENR variables¹² afin de pouvoir contrôler le système et assurer sa sécurité de fonctionnement dans les situations de forte production fatale (notamment via l'effacement préventif de production fatale ou la participation des ENR variables aux services système).

Des nombreuses technologies de stockage-déstockage peuvent être mobilisées (Figure 1). Ces technologies sont notamment caractérisées par leur temps de décharge et leur autonomie : de quelques secondes à quelques jours ou quelques mois. Elles peuvent être complémentaires ou en compétition.

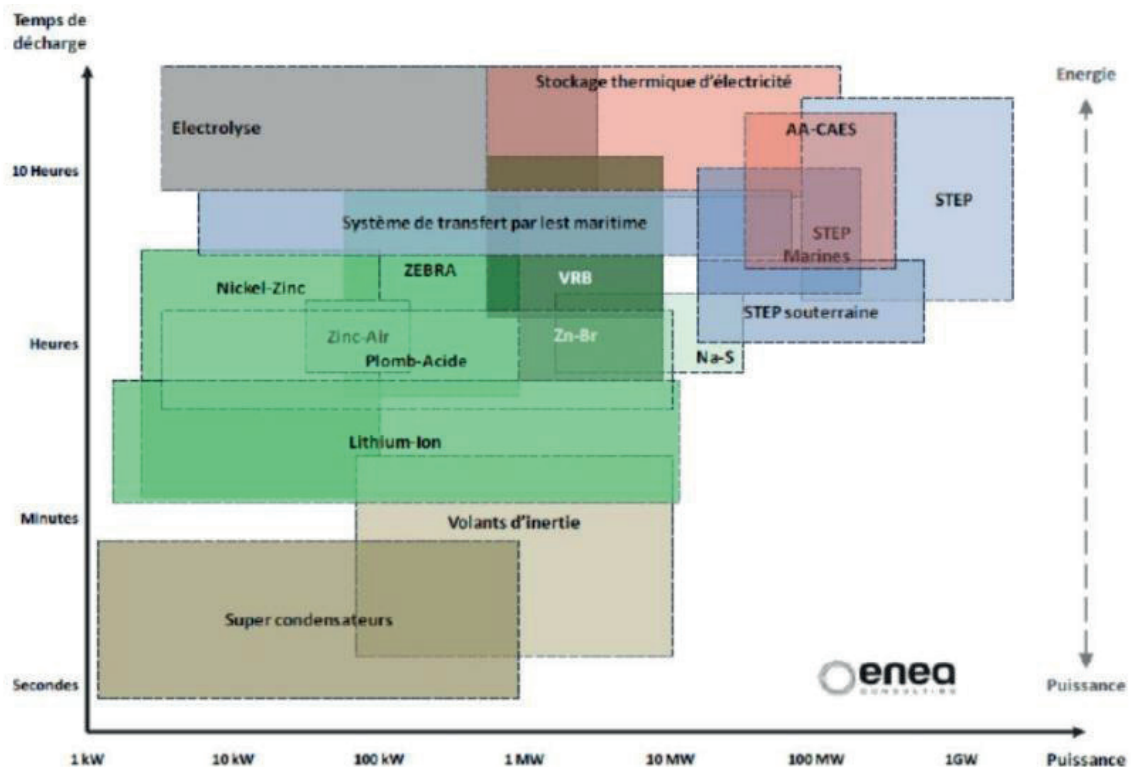
Par exemple : volants d'inertie et batteries sont en compétition pour un stockage de quelques secondes à quelques heures.

Grâce à une industrialisation de masse, en partie liée au développement des voitures électriques et aux investissements chinois sur ce marché, les batteries deviennent de moins en moins chères. Toutefois, le coût en € par kWh n'est pas le seul élément à prendre en compte, plusieurs autres paramètres comptent : la durée de vie, le rendement, le cycle de stockage, ...

Figure 1 : Caractéristiques énergie puissance des différentes technologies de stockage

source : <https://www.ecologie-solaire.gouv.fr/vers-systeme-electrique-plus-flexible>

De nouvelles incitations à la flexibilité des consommateurs peuvent être explorées. Cela concerne la flexibilité des grands consommateurs (industries ferroviaires, sidérurgiques, chimiques...) et des ensembles de petits consommateurs agrégés. Les mécanismes doivent être incitatifs, flexibles pour s'adapter aux évolutions des besoins des réseaux, et permettre la participation de tous les procédés de production particuliers (par exemple la traction ferroviaire).



c. Les nouveaux usages : numérique, véhicules électriques et autoconsommation

Capteurs et traitement d'information vont permettre de suivre plus précisément les productions et les consommations et d'interagir avec les producteurs et les consommateurs, pour réduire les pointes en temps réel. L'interaction se traduira vraisemblablement par des consignes automatiques couplées à une modulation des tarifs. Cela pourra aider à réduire non seulement les coûts, mais la consommation. La question de savoir avec quels outils et quel niveau de détail cela se fera relève en partie de la R&D.

Le système électrique doit être appréhendé dans sa globalité, en tenant compte du réseau national, des éventuels réseaux locaux mais également de réseaux privés (par exemple ferroviaire) et des nouveaux usages tels que l'autoconsommation et la mobilité électrique. L'approche systémique et multi-échelles est à privilégier.

L'impact principal de la mobilité électrique ne sera pas sur la consommation d'électricité. En effet, selon les estimations les plus hautes de RTE, un parc de 15,6 millions de véhicules électriques en 2035¹³ induirait une consommation d'électricité additionnelle de 34TWh, à comparer

13- L'analyse de RTE porte sur l'autoconsommation résidentielle individuelle. Des volumes supplémentaires pourront venir de l'autoconsommation résidentielle dans les logements collectifs ou dans le tertiaire.

à une consommation actuelle de 480 TWh. Enedis, qui retient une fourchette comprise entre 3 et 9 millions de véhicules électrique, estime que l'impact serait compris entre 8 et 25 TWh. Le comité français des constructeurs automobiles s'appuie sur un scénario médian de 9TWh, soit 3% de la consommation nationale.

En terme de puissance, l'impact des VE pourrait être significatif, notamment en ce qui concerne le renforcement du réseau de distribution. Toutefois, au-delà du nombre de véhicules, cet impact dépend des usages de la mobilité, des modes de recharge utilisés (lente ou rapide) et des comportements des usagers. Là-dessus, il existe une grande incertitude ; les estimations varient en effet de 1,6 GW à 10,2 GW en fonction de ces paramètres. Dans un cas extrême calculé par Enedis, le besoin de puissance pourrait augmenter de 10,2 GW au moment du pic de consommation du soir. Un cadre de régulation pourrait à terme s'avérer nécessaire, comme par exemple un signal tarifaire ou un système de gestion de la charge, afin notamment d'éviter un impact de la recharge sur la pointe.

Si la consommation des véhicules électriques en énergie reste relativement modeste (du fait du rendement élevé des moteurs électriques), la gestion de la courbe de charge de cet usage peut constituer un enjeu important : en prenant toujours 15,6 millions de voitures avec chacune une batterie de 30 kWh, on dispose d'un volume de stockage équivalent à la production du parc nucléaire français sur 7 heures. Avec un taux moyen d'utilisation de 20 % des batteries sur un cycle journalier cela donnerait un potentiel de flexibilité pour le système électrique. Les modèles d'affaires permettant de valoriser les services potentiels au réseau des batteries sont cependant à construire.

L'autoconsommation (individuelle ou collective) représente aujourd'hui en France moins de 0,4% de la consommation et environ 15 000 foyers (soit 0,04% des 37 millions d'abonnés raccordés au réseau de distribution). Ils sont 750 000 en Italie et plus de 2 millions en Allemagne. En France, le cadre réglementaire permettant d'accompagner l'autoconsommation a fortement évolué au cours des dernières années, favorisant ainsi son développement (loi TECV en 2015, ordonnances et décrets relatifs à l'autoconsommation électrique en 2016 et 2017).

Les scénarios élaborés par RTE prévoient un développement significatif de l'autoconsommation (principalement photovoltaïque) dès 2025 et massif à partir de 2035 . L'autoconsommation photovoltaïque ne représenterait pas, à l'échelle nationale, une part importante de la production d'électricité, même si la puissance installée pourrait atteindre 10GW en 2035. Toutefois, l'impact, notamment local, en terme de gestion du réseau peut être important et devra être pris en compte. L'autoconsommation nécessitant souvent des échanges bidirectionnels, une interface intelligente communicante sera nécessaire.

Enfin le développement de l'autoconsommation pourrait remettre en question la solidarité nationale apportée par le réseau électrique et, a fortiori, le modèle de financement des infrastructures (principe du TURPE et péréquation tarifaire).

5.

LE NUMÉRIQUE, L'UTILISATION DES DONNÉES ET LA CYBER-SÉCURITÉ

a. L'intégration du numérique

Aujourd'hui l'équilibre du réseau et l'organisation des marchés de l'électricité se fait aux bornes du réseau de transport en s'appuyant sur les moyens de production centralisés qui assurent l'essentiel des services et flexibilités nécessaires à la gestion sécurisée du système électrique et dans une moindre mesure sur les flexibilités de la consommation (effacements, ...). Le développement de moyens de production décentralisés dans les réseaux de distribution et le développement des flexibilités sur la demande à l'aval, va conduire à l'avenir à s'intéresser au niveau local (systèmes énergétiques locaux, nouveaux services aux réseaux de distribution et opportunités d'agrégation de flexibilités locales).

Le numérique pourrait apporter une réponse en permettant de mobiliser de nouveaux leviers de flexibilité (smart grid, pilotage ENR variables, ...) ainsi que de nouveaux produits et services pour valoriser ces flexibilités sur les marchés de l'électricité en Europe, en utilisant notamment

les données collectées par les compteurs Linky et les autres objets connectés. Fin 2017, 8 millions de compteurs Linky étaient installés (15 millions sont prévus fin 2018 et 35 millions le seront d'ici fin 2021) collectant les données de consommation toutes les heures et les remontant toutes les 24 heures.

L'intégration du numérique dans les réseaux électriques offre de nouvelles opportunités :

- **L'utilisation de ces données peut faciliter, au niveau territorial, l'équilibre entre la demande et la production décentralisée, en s'appuyant sur des logiciels de pilotage du système.**
- **Elle pourrait aussi, via notamment le développement des plateformes numériques, permettre le développement des nouveaux services (B2C et B2B) et donc créer de la valeur. Pour cela, certains acteurs préconisent de repenser le cadre réglementaire français en s'inspirant par exemple de la directive européenne DSP2 (Directive de Services de Paiement) qui oblige les banques à mettre à disposition des nouveaux acteurs les données bancaires de leurs clients de façon sécurisée.**

Les données peuvent être des données de production, d'usage et de contexte, de retour d'expérience du consommateur ou encore de prévisions. Leur utilisation, couplée à l'intelligence artificielle et à l'internet des objets, peut également répondre à d'autres besoins du réseau tels que la gestion des actifs et la maintenance, le diagnostic des défauts, l'électromobilité, la visualisation & le traitement des données, l'observation des réseaux, etc.

Les « Digital Ledger technologies », plus communément qualifiées de blockchains (chaines de blocs d'information), permettent d'organiser et d'enregistrer des données de manière distribuée (c'est-à-dire disséminées dans un réseau non hiérarchisé) et théoriquement infalsifiables. Dans le domaine de l'électricité, ces technologies demandent des investigations dans un contexte à la fois sociologique et réglementaire susceptible de conduire à l'émergence de pratiques d'autoconsommation et à la structuration autour de micro-grids. Des questions de recherche sont soulevées notamment s'agissant des algorithmes utilisés par les blockchains.

La consommation électrique liée aux objets connectés et à leur exploitation devra être évaluée et pris en compte dans les modèles d'affaires associés.

b. La cyber-sécurité

Le réseau électrique est un système critique, réparti géographiquement et comportant de nombreuses interfaces. L'introduction croissante du numérique va l'exposer à des attaques dont les conséquences pourraient être lourdes.

Au-delà de la protection des outils informatiques, des études doivent être menées afin d'identifier les vulnérabilités des réseaux électriques et leurs conséquences.

De nombreux composants électroniques et informatiques participent à la conduite du système électrique par les gestionnaires du réseau (RTE et Enedis), ainsi que par les producteurs et responsables d'équilibres. La corruption de ces composants par une attaque virale pourrait fortement perturber le fonctionnement du réseau, voire entraîner un black-out. Il s'agit des principaux points critiques.

Les vecteurs d'attaques ne sont pas spécifiques aux systèmes électriques :

- **Un virus peut corrompre un réseau lors de la mise à jour d'un composant du système. Dans ce cas, il s'agit de virus et d'algorithmes complexes ne pouvant émaner que d'États ou d'organisations d'ampleur.**
- **Les attaques de type Hameçonnage (Phishing : courrier électronique adressé à un grand nombre de personnes et visant à obtenir identifiants et mots de passe) peuvent également représenter un risque. L'humain est souvent le maillon faible dans ce type d'attaque. La sensibilisation aux bonnes pratiques reste indispensable.**

Enfin, l'arrivée de nouveaux acteurs représente également un risque : les petits opérateurs sur le marché de l'électricité (par exemple pour la vente de capacité d'effacement) ou les petits producteurs ne sont pas soumis aux mêmes exigences en matière de sécurité des systèmes d'information que les Opérateurs d'Importance Vitale (OIV, Code de la Défense). Ils représentent des cibles potentielles.



c. Modèles économiques & modèles d'affaires

Le cadre conceptuel permettant de définir les investissements à long terme est à repenser. L'importance et le coût des changements à venir nécessitent de s'appuyer sur des modèles économiques d'aide à la décision.

Cela touche à la fois les investissements matériels et la façon de les utiliser : la décentralisation et la multiplication des sources de production, l'auto-consommation, les nouveaux usages (véhicules électriques et développement des plateformes), ce sont autant de changements à étudier.

La construction de modèles et d'outils numériques capables de produire des images cohérentes du futur et des chemins technologiques vers ces images reste un objectif à soutenir pour apprécier l'alignement des politiques publiques, les efforts de R&D et les stratégies industrielles au regard des objectifs climatiques. Cela passe par l'articulation de modèles d'optimisation des systèmes techniques et de modèles d'équilibre général macro-économiques pour représenter dans un même cadre des modèles d'activités humaines généralement développés séparément (énergie, transport, occupation des sols) et des travaux portant sur des échelles géographiques différentes.

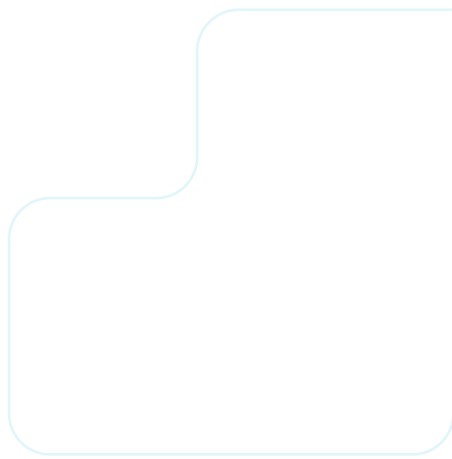
Les nouvelles technologies ainsi que les nouveaux usages offrent de nombreuses opportunités de développement économique :

- **L'introduction du numérique et le déploiement de plateformes de partage des données fait intervenir de nouvelles activités et de nouveaux acteurs qui traditionnellement ne sont pas présents dans le domaine de l'énergie et modifient la chaîne de valeur actuelle.**
- **Le développement du véhicule électrique peut également avoir un impact majeur, qu'il s'agisse de l'électromobilité, du couplage entre mobilité et service au réseau (stockage stationnaire) ou encore, à plus long terme, des véhicules autonomes. Le marché, jusqu'à présent standardisé « diesel + essence », va se fragmenter (moteur thermique, hybridation, moteurs électriques, usages urbain, transport de marchandises, ...) avec dans chaque cas des modèles d'affaires à définir.**

- **Le stockage : le stockage peut trouver une valeur économique dans les écarts de prix de l'énergie et les différents services qu'il peut rendre aux réseaux.**
- **Au-delà du Power to H2, le stockage d'énergie électrique sous forme d'hydrogène trouvera sa valeur quand d'autres usages seront ouverts à l'énergie décarbonée (industrie, transport, résidentiel). Les modèles économiques d'emploi de l'H2 dans l'énergie (Power to H2, pile à combustible, méthanation) sont plus lointains. Le marché moteur sera d'abord celui de l'hydrogène industriel.**

Dans un système multi-sources, des modélisations intégrant l'ensemble des sources d'énergies (électricité, gaz, chaleur, hydrogène, ...) sont indispensables pour définir les nouveaux modèles : ces modèles doivent couvrir différentes mailles, intégrer différentes technologies et répondre à des situations de production et de consommation contrastées.

Atteindre les objectifs de décarbonation ne se fera pas sans une accélération très vigoureuse des innovations, s'agissant aussi bien des méthodes économiques, de la prospective et de la mobilisation des SHS pour l'évaluation des politiques publiques. Les moyens d'évaluation actuels en France intégrant des visions et concepts non seulement techniques, mais aussi économiques, sociaux, environnementaux, historiques... sont en net retrait par rapport à ce qui apparaît souhaitable. À ce titre, il conviendrait de lancer une réflexion structurée, en lien très étroit avec les organismes de recherche, pour proposer la mise en place d'un réseau diversifié et de hautes compétences, capable de répondre rapidement à des sollicitations des élus et du gouvernement.



03 LES PRIORITÉS DE R&D ET LES ALERTES

Cette partie propose, en s'appuyant sur les travaux du groupe de travail mais également les nombreuses études menées sur ces sujets, une série d'alertes et de recommandations relatives aux questions de R&D. La liste de ces priorités identifiées n'a pas vocation à être exhaustive, le groupe de travail s'est attaché à mettre du relief s'agissant des sujets et des façons de travailler.

S'agissant de la question de la maturité, l'approche TRL ne s'applique pas forcément à tous les sujets abordés. Enfin, la question des calendriers et des moyens associés serait à traiter dans le cadre de l'approfondissement du travail sujet par sujet.

Ce qui peut être mis en commun sur ce sujet entre les entreprises et avec la recherche publique reste à définir dans les différents domaines. Cela passerait par une première phase de travail collaboratif.

1.

LA STABILITÉ ET LE PILOTAGE DU RÉSEAU

L'introduction dans un réseau naguère alimenté exclusivement par des alternateurs à forte inertie d'une proportion croissante de générateurs statiques (photovoltaïques) ou non accrochés à la fréquence du réseau (éoliennes) fait apparaître des problèmes sur lesquels la recherche peut apporter une contribution significative :

- **La contribution locale au réglage de fréquence et la répartition plus ou moins centralisée et automatisée du pilotage (cf. la question des boucles locales)**
- **La modélisation multi-échelles de systèmes énergétiques hybrides associant électronique et électrotechnique à différentes mailles**

- **La résilience et reconstitution du fonctionnement du réseau : les conditions d'isolation et de raccordement de certaines parties du réseau, pour éviter la propagation des perturbations, ou pouvoir rétablir le courant le plus vite possible.**

Il s'agit de :

- **modéliser par des approches multi-échelles le réseau électrique de demain avec différents scénarios techniques, économiques et réglementaires, afin notamment d'évaluer et d'optimiser les coûts d'intégration des EnR.**
- **s'en servir pour anticiper les problèmes qui peuvent apparaître : gestion de la fréquence, condition d'isolation et de raccordement, ... sachant qu'à une grande échelle la reconstitution du fonctionnement du réseau est une préoccupation majeure.**

Ces besoins nouveaux liés à l'introduction des EnR risquent de dépasser les capacités de R&D de chacun des grands acteurs de l'énergie électrique. Il y a donc intérêt :

- **à ce que ces entreprises mettent au maximum en commun les problématiques de recherche, les bases de données et les outils de modélisation.**
- **à faire travailler ensemble les laboratoires d'électronique et d'électrotechnique concernés par les problèmes de modélisation des réseaux, en interaction étroite avec les entreprises, afin de développer des modèles de systèmes/infrastructures hétérogènes associant électrique et numérique.**

À ce titre, les Zones non-interconnectées (ZNI) et les territoires insulaires constituent de véritables terrains d'expérimentation qui permettent, en relâchant certaines contraintes (notamment le coût) de tester des solutions et des technologies.

2.

L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE, DE CONTRÔLE ET DE TRAITEMENT

L'électronique de puissance va prendre une importance croissante. Sont en cause :

- **Ses performances intrinsèques (rapidité, consommation, rendement, prix de revient) dans la grande diversité des appareils ;**
- **Le degré d'intelligence associé à chaque appareil ;**
- **La disponibilité des technologies et des composants, face aux risques de monopole asiatique.**

Il faudrait étudier les risques de dépendance vis-à-vis de producteurs non-européens des différents matériels d'électronique de puissance, analyser les compétences des acteurs français, celles qu'il ne faut pas perdre, celles qu'il faut créer ou développer, et quelles alliances établir au niveau européen.

3.

LE STOCKAGE ET LES MOYENS DE FLEXIBILITÉ

Le réseau électrique devra demain s'appuyer sur une offre de flexibilité plus importante en raison de l'augmentation du taux de pénétration des EnR variables. Différents points relèvent de la recherche :

- **Les progrès des batteries en capacité, cyclage, durée de vie, respect de l'environnement, disponibilité des matériaux, coût.**
- Sachant que :**

- Il sera difficile de contrer la domination industrielle asiatique. Dans le domaine des batteries, le marché est tiré par la mobilité électrique. Il est aujourd'hui dominé par les acteurs asiatiques et la technologie Li-ion. Pour les réactions françaises et européennes en projet, deux voies sont possibles, etc.
- On ne pourra ainsi stocker que quelques heures de production d'électricité.
- Il faut prendre en compte le cycle de vie complet de la batterie (profondeur de décharge, vieillissement en température, cycle de charge/décharge, maintien des

performances, ...) ainsi que la question de son recyclage.

- **L'hydrogène, via l'électrolyse et les piles à combustible ou la méthanation, peut être la seule solution « propre », hors STEP, pour le stockage d'électricité longue durée. Cependant, le marché principal restera pour plusieurs années principalement la chimie et l'enjeu est de parvenir à un prix de revient acceptable, ce qui dépendra en partie du prix du CO2.**
- **La valorisation des interactions entre les différents vecteurs énergétiques : à plus long terme, la transformation de l'électricité en un autre vecteur énergétique (« Power to X », principalement gaz et chaleur) » présente un potentiel de flexibilité dont le business model reste à définir.**

Dans le domaine des batteries, le marché est tiré par la mobilité électrique. Il est aujourd'hui dominé par les acteurs asiatiques et la technologie Li-ion. Deux voies sont possibles :

- **Si les constructeurs automobiles français et européens acceptent de privilégier des fournisseurs européens, cela pourra permettre le maintien d'une filière Li-ion européenne. Les travaux des laboratoires auront alors un sens, à condition d'être couplés à ces industriels.**
- **Le Li-ion est loin de répondre à ce que souhaitent les usagers (notamment s'agissant du rayon d'action de leur véhicule). Il y a une place pour une recherche de rupture visant à obtenir ces performances.**

4.

L'UTILISATION DES DONNÉES

On va vers davantage de décentralisation et la constitution de boucles locales, pour les raisons suivantes :

- **La multiplication des sources de production, principalement due au photovoltaïque**
- **L'urbanisation notamment, qui induira davantage de mise en commun des consommations locales de tout type, et associera les collectivités au pilotage.**

Les recherches porteront sur :

- **La répartition de l'intelligence de contrôle, de l'appareil individuel au réseau central haute tension ; il s'agit d'un champ de recherche à développer en commun entre les gestionnaires de réseaux et leurs fournisseurs français et européens.**
- **L'usage des données et les blockchains : les projets collaboratifs portant sur le partage et l'utilisation des données, notamment ceux impliquant les collectivités locales sont à encourager.**
- **L'étude des nouveaux usages, du comportement du « consom'acteur » et des modèles économiques associés.**
- **La sécurité (cf ci-dessous).**

5.

LA CYBER SÉCURITÉ

La multiplication des points d'entrée et des échanges d'information accroît la vulnérabilité du réseau, avec des conséquences qui peuvent être dramatiques.

La recherche rejoint en partie celle qui est faite pour la protection des systèmes informatiques. Elle peut aussi porter sur la répartition optimale de l'intelligence et sur la protection des objets eux-mêmes.

Deux axes de R&D sont à privilégier :

- **Empêcher la survenue d'une telle attaque : Un virus est un programme informatique dont il faut étudier le comportement. Par exemple, détecter un virus de type dormant collectant des informations avant de devenir actif, peut s'avérer complexe : il est nécessaire d'étudier les comportements anormaux dans une grande quantité d'informations (R&D sur le « machine learning » et l'intelligence artificielle).**
- **Étudier les conséquences d'une telle attaque : les travaux doivent porter sur les modalités de redémarrage du réseau. À l'inverse d'une défaillance du réseau suite à un problème matériel, une cyber-attaque nécessite d'isoler la partie du réseau atta-**

quée afin de l'étudier. Le redémarrage de cette partie est complexe, et le retour à un fonctionnement nominal peut prendre 2 à 3 semaines.

6.

LES MODÈLES ÉCONOMIQUES

Même si leur niveau dépend des volontés politiques, les seuils d'acceptabilité économique vont être déterminants dans ce secteur où les investissements sont particulièrement lourds.

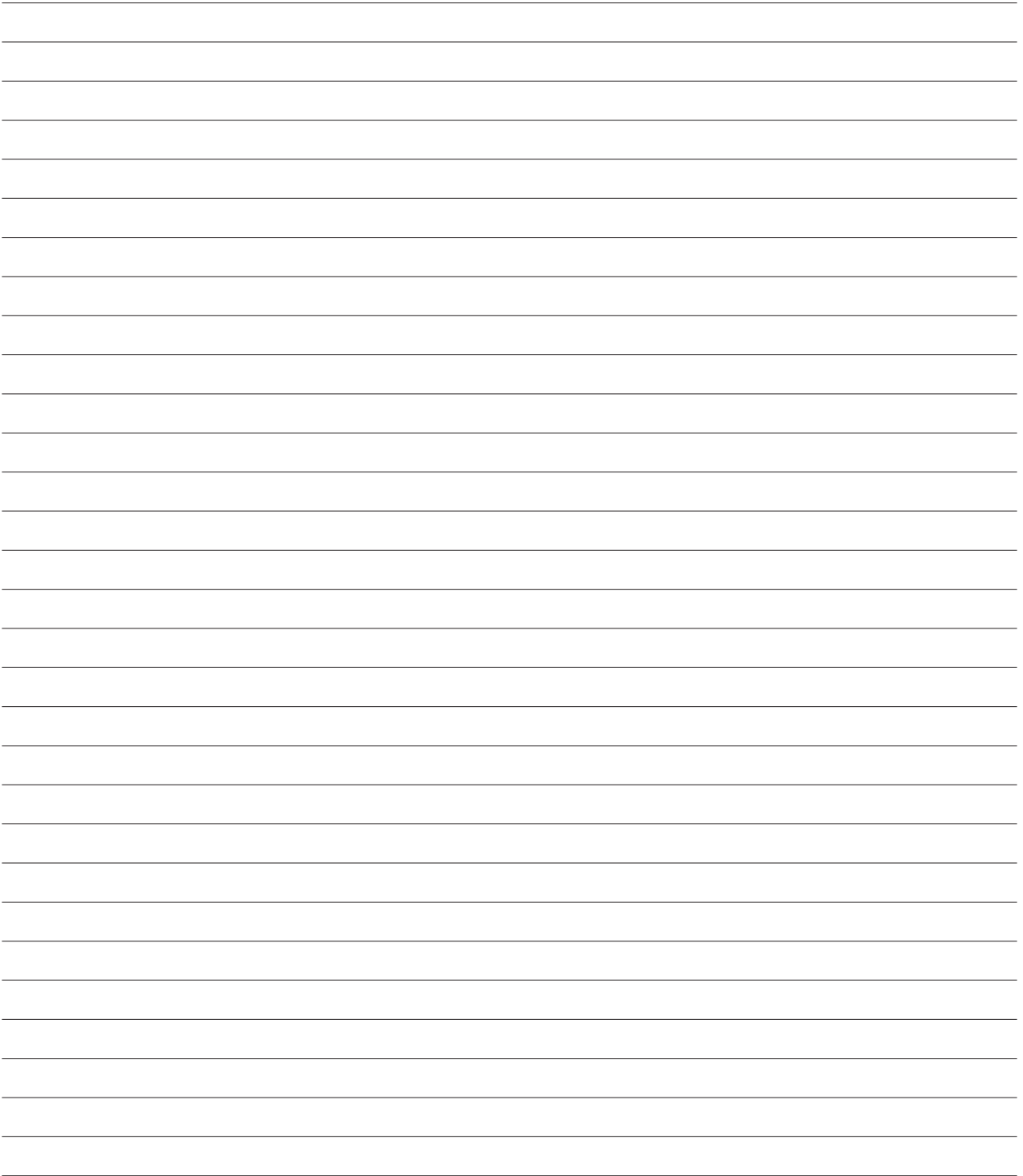
Les modèles économiques sont nécessaires pour éclairer les orientations et les décisions, cela dès le niveau de la recherche. Le stockage et les conditions d'acceptabilité de l'hydrogène constituent un bon exemple.

L'établissement et l'entretien de ces modèles nécessitent une recherche associant entreprises, recherche publique, État et collectivités, et impliquant non seulement l'économie, mais la physique, la chimie, l'informatique, la sociologie....



NOTES

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.





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