



QUELLE R&D MENER POUR LE DÉVELOPPEMENT DES
réseaux d'énergie
de demain ? 

LES PROPOSITIONS DE L'ANCRE
EN 2015



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

ANIMATEURS DU GROUPE PROGRAMMATIQUE "RÉSEAUX ET STOCKAGES" DE L'ANCRE

➤ **N. Hadjsaïd** - (Université Grenoble Alpes/G2ELAB)

Nouredine.Hadjsaid@g2elab.grenoble-inp.fr

➤ **N. Mermilliod** - (CEA)

nicole.mermilliod@cea.fr

➤ **P. Brault** - (CNRS)

Pascal.BRAULT@cnrs-dir.fr

REMERCIEMENTS :

Les animateurs du Groupe Programmatique « Réseaux et Stockage » (le GP 10) de l'ANCRE, porteurs de cette feuille de route « Vision de la R&D à mener pour les Réseaux d'Énergie de demain », tiennent à remercier chaleureusement tous ceux qui par leurs apports ou par leur lecture critique ont permis d'enrichir ce document, et notamment les membres du GP10, des collègues du CEA, dont Cédric Paulus contributeur réseaux de chaleur/froid, des collègues du G2ELAB ainsi que des experts d'EDF, ERDF, RTE, de l'ADEME et de la CRE. Ils tiennent également à remercier le Consortium de Valorisation Thématique (CVT) de l'ANCRE dont le soutien financier a permis la publication de cette feuille de route.

Sommaire

- 3 Introduction
- 5 Verrous techniques
 - 5 Architecture et planification des réseaux
 - 7 Intégration des Renouvelables
 - 8 Exploitation des systèmes
 - 11 Stockage
 - 12 Interdépendances avec les autres infrastructures
 - 13 Interactions entre réseaux d'énergie
 - 15 Spécificités réseaux de chaleur/froid
- 17 Verrous normatifs
- 18 Verrous réglementaires, économiques et de politiques publiques
- 19 Verrous organisationnels et sociétaux
- 20 Annexes 1
 - 20 Les verrous et objectifs des stockages d'électricité
- 23 Annexes 2
 - 23 Glossaire
- 24 Annexes 3
 - 24 Membres du GP10



Introduction

- **Domaine couvert et spécificité de cette feuille de route « Réseaux et Stockage d'énergie »**

Cette feuille de route concerne les réseaux d'énergie électrique, de chaleur et de froid, les réseaux de gaz (hydrogène, gaz naturel), leurs stockages associés, ainsi que leurs couplages à venir dans le cadre de la transition énergétique et des évolutions qui l'accompagneront, que ce soit sur les modes de production d'énergie ou sur l'évolution des usages.

Le focus est porté sur les réseaux électriques qui seront les premiers impactés par cette transition énergétique. Hormis quelques éléments très spécifiques aux réseaux électriques (et qui seront notés dans le texte par une couleur différente) il est à souligner que la quasi-totalité des considérations et axes de R&D évoqués pour les réseaux électriques et le développement de leur « intelligence » et/ou de leur flexibilité s'appliquent également aux autres réseaux d'énergie.

Par ailleurs, si le **groupe programmatique « Réseaux et Stockage » de l'ANCRE (GP10)** s'est largement appuyé sur les nombreuses feuilles de route émises tant au niveau national, dont celles de l'ADEME, qu'européen, il a également souhaité s'en démarquer en insistant largement et en détaillant les recherches scientifiques et technologiques à mener face aux verrous actuellement identifiés.



- **Rappel du contexte et des évolutions attendues pour les réseaux d'énergie**

Le premier objectif des réseaux d'énergie est bien évidemment la desserte des consommateurs et l'optimisation des systèmes énergétiques à une échelle aussi bien locale que nationale et européenne, et ceci dans les meilleures conditions de sûreté et d'économie. A ce titre les réseaux électriques et gaziers Français ont été particulièrement bien conçus et sont reconnus pour leur performance et leur fiabilité.

Néanmoins l'environnement européen d'une part, et la loi sur la transition énergétique d'autre part, amènent à reconsidérer la situation. En effet de nouveaux défis apparaissent pour les réseaux avec l'intégration croissante des sources renouvelables variables et locales, ainsi que le développement de nouveaux usages de l'électricité avec la mobilité électrique ou hybride, la multiplication des équipements dits de haute technologie dans les foyers (écran plat, ordinateur portable, téléphone portable ou *Smartphone*, tablette multimédia, console de jeux, etc.), ou encore les bâtiments à basse consommation (BBC) dont les modes de chauffage et de production d'eau chaude ou de froid peuvent également évoluer, notamment dans le cadre des villes de demain (*smart cities*).

Ces défis concernent peu ou prou tous les réseaux d'énergie, électricité, chaleur, froid, gaz naturel. Mais ils sont particulièrement importants à relever pour le système électrique qui doit adapter en temps réel l'offre et la demande, malgré la variabilité croissante tant de l'offre que de la demande, avec une gestion des pointes de consommation comme de production et ce, tout en assurant la fiabilité et la sécurité des réseaux, en veillant à maximiser les rendements de production des sources d'énergie à faible coût marginal.





Ils nécessiteront d'exploiter toutes les flexibilités envisageables : effacement et modulation de la consommation, foisonnement, stockage, ainsi que le couplage entre réseaux -qui peut être considéré comme une forme de stockage-, voire limitation/effacement de certaines productions.

À titre d'exemple les réseaux de distribution d'électricité vont devoir intégrer l'énergie produite par des centaines de milliers voire des millions de petites unités de production locales et le plus souvent variables (μ -éolien, photovoltaïque), s'adapter à une tendance à l'autoconsommation croissante, que ce soit au niveau de particuliers « consommateurs » voire de collectivités, aux évolutions de la demande avec la recharge de millions de véhicules électriques ou hybrides, le développement de bâtiments à basse consommation ou à énergie positive et de réseaux de chaleurs ou de froid qui pourront fournir eau chaude, chauffage et climatisation. La maille locale va ainsi prendre une importance croissante ainsi que la relation avec l'ensemble des utilisateurs des réseaux.

De la même manière les réseaux de transport d'électricité auront à gérer les grandes centrales renouvelables variables ainsi que le foisonnement à de plus en plus grande échelle, avec une coordination renforcée aussi bien à l'échelle Européenne qu'au niveau local avec les réseaux de distribution, et les besoins en stockage massif ou en effacement massif, via de grands donneurs d'ordre et/ou des agrégateurs. À cette échelle un couplage optimisé avec les autres réseaux énergétiques est à envisager dans le futur.

On voit donc apparaître une complexité croissante tant en termes d'architecture que de planification des infrastructures, des évolutions des modes de gestion des réseaux, des stockages d'énergie, le besoin de développement d'outils d'anticipation de l'offre comme de la demande, et l'intervention de nombreux nouveaux acteurs, des usagers comme des acteurs des télécoms, les agrégateurs, les collectivités, ainsi que la numérisation croissante du système électrique et de l'ensemble des réseaux... Par ailleurs cette complexité à la fois technologique et socio-économique se développe sur des échelles importantes, tant temporelles (de la seconde à la saison) que géographique (du bâtiment à la plaque européenne).

L'ensemble de ces facteurs amène à repenser l'énergie avec une vision plus globale, intégrant ses différentes formes (électricité, chaleur/froid, hydrocarbures et hydrogène), les réseaux et stockages associés, leur observabilité, leur intelligence et leurs couplages, tout en prenant en compte les contraintes juridiques, économiques, sociétales et environnementales, dont les contraintes sur les matériaux et leur disponibilité.

Mais qui dit complexité dit aussi sources d'innovations technologiques et de nouveaux marchés pour la France, qui peut, de fait, s'appuyer sur un tissu important de grandes entreprises et de PME-ETI, ainsi que sur des organismes de recherche reconnus dans ce domaine, dont ceux de l'ANCRE.

Le groupe programmatique « **Réseaux d'énergie et stockage** » de l'ANCRE propose ainsi une feuille de route sous forme d'un guide des verrous actuellement identifiés pour le développement des réseaux d'énergie :

- **verrous techniques**, bien sûr, mais aussi
- **verrous normatifs, réglementaires**,
- **économiques, de politiques publiques**, ou encore
- **organisationnels et sociétaux**.

A chacun de ces verrous sont associés des pistes de recherche et développement qui pourraient permettre à notre pays de se positionner sur les marchés nationaux, européens voire mondiaux non seulement au niveau de l'amélioration des connaissances mais également par des produits, systèmes et services innovants. ●





NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
<p>Manque/renforcement d'outils de conception d'architecture supportant des modes d'exploitation décentralisée et autres architectures innovantes et de planification</p>	<p>ÉVOLUTION DU RÉSEAU</p> <ul style="list-style-type: none"> > Lourdeur des simulations sur des grands systèmes complexes et en dynamique > Architectures innovantes permettant une plus grande pénétration de la production décentralisée intégrant la fiabilité et l'évolutivité > Architectures couplées énergie-communication > Lien avec le développement des smart-cities et multi énergie/multi fluide > Instrumentation et capteurs > Déploiement des architectures AC/DC, leur contrôle-commande, leur protection y compris au niveau des microgrids raccordées au réseau principal 	<p>CT-MT *</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement outils simulation et co-simulation pour planification et opération réseau dans un contexte incertain • Prise en compte des ruptures technologiques dans les simulations • Conception d'architectures flexibles et couplées (multi infrastructure, énergie, TIC) entre électricité, chaleur, froid et gaz naturel, voire l'eau (notamment, sur la flexibilité offerte par le stockage de l'eau) • Conception de nouvelles architectures embarquant une intelligence distribuée, adaptatives et facilitant l'auto-cicatrisation • Analyse des interactions topologie-modes d'exploitation
<p>Déploiement des technologies DC</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Maillage de lignes DC (MTDC - Transport et distribution) pour le raccordement des EnR et transport énergie à faibles pertes, transports sous-marin et souterrain, découplage des réseaux, transport à très longue distance et fortes énergies > Interactions et convertisseurs AC/DC > Déploiement de solution DC (HTA ou BT) pour le raccordement d'installations de production hybride (synchrone, asynchrone, statique) équipées de dispositif de stockage avec bus à courant continu > Déploiement de réseaux DC (BT) en aval compteur pour le raccordement des appareils domestiques, des véhicules électriques, de la production photovoltaïque et du stockage d'énergie par batterie sur le même réseau DC 	<p>MT-LT *</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de technologies pour améliorer le transport DC et la stabilité du système électrique incluant l'optimisation des chaînes de coupure (protection, limitation, coupure...) pour les réseaux DC maillés • Analyse et compréhension de la propagation des dynamiques dans les grands réseaux couplés AC/DC • Analyse, commande et interaction des structures AC/DC • Développement de nouveaux composants et structures EP pour ces architectures • Développement de solutions DC, incluant les dispositifs de commande et de protection (notamment la continuité du neutre), pour le raccordement de redresseur (AC-DC) ou de hacheur (DC-DC) ou d'onduleur (DC-AC) sur des bus à courant continu • Intérêt économique à déployer des réseaux à courant continu dans l'habitat domestique • Analyse des interactions entre les réseaux à courant continu et à courant alternatif en BT chez les particuliers

* CT = Court Terme (0-5 ans) MT = Moyen Terme (5-10 ans) LT = Long Terme (10-20 ans)

Verrous techniques 1 ARCHITECTURE ET PLANIFICATION DES RÉSEAUX (2/2)



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
<p>Équipements qui peuvent devenir inadaptés et maintenance</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Face à une variabilité croissante de l'état du réseau > Endurance des interrupteurs, disjoncteurs à coupure fréquente, régulateurs de charge à forte sollicitation, transformateurs embarquant une intelligence locale, ... > Maintenance prédictive 	<p>CT-MT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Méthodes de détection de défauts et de pannes sur des systèmes dynamiques • Télémaintenance et actualisation des logiciels embarqués • Lois de vieillissement des composants et apport du big data pour la maintenance individuelle optimisée et le diagnostic • Autodiagnostic communicant des matériels du réseau • Outils de maintenance préventive intégrant l'évolution des technologies Smartgrids et leur hétérogénéité
<p>Lourdeur des investissements</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Gestion patrimoniale fine et sur le long terme ; manque outil de planification dédiés pour les acteurs territoriaux (volet Energie des SCOT) > Planification réaliste des coûts et impacts économiques > Évolutions par paliers > Nécessité de « sûreté » des innovations implantées > Dynamiques des Investissements énergie vs TIC 	<p>MT-LT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation et méthodologies d'évaluation des coûts d'infrastructure • Développement d'outils de planification des investissements et des paliers de transition • Plateformes de démonstration, d'expérimentation et de tests en conditions réelles de nouveaux composants et algorithmes • Évaluation de l'impact des solutions d'intelligence embarquée sur les investissements à long terme • Exploitation des masses de données pour la gestion des actifs (vieillessement, anticipation des défaillances, multiplication des technologies avec de l'intelligence embarquée...) • Prise en compte de la différence des cycles de vie des technologies de l'énergie et des TIC
<p>Manque méthodologies globales (intégrales) d'évaluation des coûts vs bénéfices énergétiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Déploiement des fonctions de capture et d'analyse de l'information, de monitoring et contrôle à différentes échelles spatiales et temporelles > Méthodologies d'évaluation, génériques, qui permettent de prendre en compte le caractère « système » > Coût énergétique des TIC Évaluation précise des coûts d'externalités et intégration des considérations réglementaires et institutionnelles > Connaissance précise de la propagation de valeur ajoutée générée > Prise en compte de la multiplicité d'acteur et l'éclatement des responsabilités et scénarios et de jeux de données consensuels 	<p>CT-MT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Optimisation des stratégies de capture d'information, agrégation des données pour limiter le coût énergétique associé aux données (choix de l'échelle et de la localisation de la capture et du traitement des informations) • Méthodes d'évaluation couplées réseau, économie, sociétale et environnement • Méthodes stochastiques de modélisation lien charge -signaux économiques • Apport des méthodes de modélisation par agent et de théorie des jeux pour l'évaluation de l'interaction entre acteurs et impacts sur le système dans sa globalité



NATURE

Monitoring, Pilotage et contrôle / commande

DESCRIPTION

- > **Outils d'observabilité et de pilotage du local au global** en présence de parts importantes d'EnR voire de VHER
- > Dispositifs en réseau communicants et coordonnés
- > Outils de pilotages coordonnés entre le centralisé et le décentralisé
- > **Schéma d'exploitation optimisée** des réseaux de distribution en présence de production décentralisée
- > Monitoring des réseaux extérieurs avec peu d'informations ou avec peu de mesures, (technologies aux interfaces des différents réseaux)
- > **Coordination entre les réseaux de transport et de distribution** en présence de forte pénétration des EnR variables et des nouveaux usages

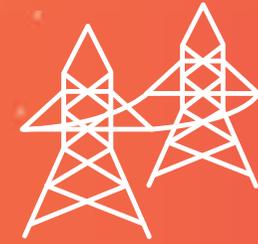
PRIORITÉ

CT-MT

AXES R&D

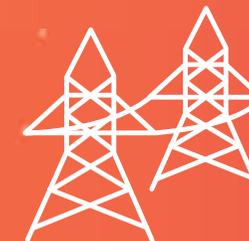
- Modélisation de grands systèmes avec divers degrés de précision pour des analyses de sûreté en quasi temps réel
- Détection en temps réel des instabilités et développement de nouveaux algorithmes de prévision et aide à la décision pour éviter les instabilités, du niveau local jusqu'au niveau pan-européen. (iTesla toolbox) (EEGI)
- Conception de WAMS/WACS plus performants et coordonnés à différentes échelles notamment pour les réseaux de transport et d'interconnexion au niveau Européen
- Optimisation de la contrôlabilité du système en proposant des outils pour l'usage optimal et coordonné des équipements apportant de la flexibilité (FACTS, onduleurs, HVDC links, ...) (EEGI)
- Nouveaux outils de pilotage de l'énergie en aval compteur en lien avec le réseau (onduleurs, agrégation d'énergie, BMS de véhicules électriques et gestion bornes de recharges, ...)
- Amélioration de l'exploitation des données de comptage et de monitoring pour la modélisation de charge, monitoring et pilotage y compris au niveau du concentrateur de données
- Outils avancés de téléconduite décentralisés (distribution), dont gestion des flux électriques/de la tension, estimateur d'état local et autre outils d'observabilité précis à différents niveaux du réseau, Détection et Localisation de Défauts avancées, auto-cicatrisation y compris en BT, ...
- Gestion de la complexité/fiabilité/évolutivité
- Nouveaux capteurs bas coûts et communicants, outils de téléconduite face aux évolutions topologiques et compréhension de l'impact des différents niveaux d'incertitude sur la performance du système de monitoring et de pilotage
- Conception/amélioration d'outils et de technologies pour la gestion et le pilotage de réseaux locaux avec production décentralisée
- Augmenter (ou remplacer) l'inertie du système, globalement diminuée par le recours aux EnR à interface l'électronique de puissance, sans avoir recours au stockage (essentiellement par le contrôle-commande)





NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
<p>Quantification des (nouveaux) usages, maîtrise de la consommation</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Flexibilité de la demande et de la production « variable » ; quantification de la flexibilité > Comptage des délestages > V2G > Actionneurs en réseau incluant les compensateurs et postes intelligents > Prévision consommation à différentes échelles spatiales et temporelles (court, moyen et long terme), perspectives d'évolution courbe de charge 	<p>MT-LT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de solutions fines incluant l'évaluation des gisements précis pour l'effacement partiel ou total de certaines consommations (y compris V2G) et productions ; évaluation de leur impact sur le système dans sa globalité • Reconnaissance des appareils et des usages couplée à une analyse des masses de données et des algorithmes incluant les probabilités de réponse de gestion et IHM • Développement d'électronique de puissance basse consommation en lien avec la vision système • Étude des motivations / incitations des consommateurs ; Étude de scénarios à 2030 – 2050 • Apports des objets communicants
<p>Protection, sûreté des réseaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Inadaptation des protections et plans de protections aux nouveaux paradigmes > Évolutivité des protections anti-îlotage et de découplage > Sûreté des réseaux en présence d'objets intelligents multiples et hétérogènes > Sûreté des logiciels > Cybersécurité 	<p>CT-MT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de nouvelles protections (algorithmes et plans) adaptées à de nouvelles topologies de réseaux et de nouvelles dynamiques • Développement de nouveaux plans de défense des réseaux • Méthodologie de vérification des logiciels de contrôle et surveillance des réseaux • Protection des réseaux DC sur l'ensemble de la chaîne de coupure (détection, limitation, coupure, reconfiguration, ...) • Cyber-protection des réseaux et accès aux organes de gestion de données et logiciels de contrôle-commande • Développement de nouveaux outils de diagnostic temps réel des équipements de réseaux autocalorisants adaptatifs à différents niveaux des réseaux et d'évolution des technologies • Méthodes d'analyse de sûreté de fonctionnement multi-infrastructures • Développement d'outils dynamiques d'évaluation de la sûreté de fonctionnement des réseaux • Nouvelles méthodes d'anti îlotage performantes et évolutives





NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
<p>Augmentation du caractère stochastique de la chaîne d'énergie et de la quantité d'informations</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Gestion d'un nombre croissant de sources variables, non observables, non commandables et délocalisées > Gestion temps réel d'un grand nombre de données > Hétérogénéité des données et de leurs sources 	<p>CT-MT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de nouveaux modèles et stratégies d'intelligence : centralisation pour assurer un équilibre global au niveau national et européen et décentralisation pour optimiser les usages et les ressources au niveau local • Développement de nouveaux outils de calcul et d'évaluation via des approches probabilistes et stochastiques ; prise en compte de données incertaines ou manquantes • Agrégation, fouilles de données massives et hétérogènes, optimisation des interactions entre matériels porteurs d'intelligence, analyse sûreté de l'ensemble • Exploitation de données massives, temps réel et hétérogènes pour la gestion et la planification du système électrique • Développement d'outils pour améliorer la connaissance de l'état instantané du réseau, y compris au niveau européen • Investigation de l'apport des réseaux sociaux, du cloud computing et des objets communicants
<p>Interface réseau électrique/réseau télécom (lien avec le verrou 5)</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Différence des durée de vie entre hard et soft : des équipements et produits soft et télécom par rapport à ceux du système électrique > Méconnaissance des systèmes hétérogènes couplés (modes de défaillance, cybersécurité, interdépendances, ...) > Maîtrise de la sûreté des systèmes intégrant les technos IP > Manque de transmission des informations entre les différents niveaux de la chaîne énergétique 	<p>CT-MT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation et simulation de systèmes complexes multi-domaines multi-échelles • Développement de modes d'interaction cryptés ou autres solutions de cybersécurité • Méthodes d'identification de la criticité/vulnérabilité et des modes communs des architectures couplées (énergie-TIC) • Développement des « métriques/benchmark » pour l'étude de la sûreté des systèmes couplés • Adaptation des méthodes d'analyse de sûreté pour les systèmes couplés en dynamique • Méthodes d'évaluation des performances de transmission d'information compteur-réseau: monitoring et pilotage • Augmentation des performances du CPL G3 et au-delà en BT, HTA, concentrateurs et différents niveaux de monitoring et pilotage



Verrous techniques 4 STOCKAGE



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
Composant	<ul style="list-style-type: none"> > Coûts élevés, > Fiabilité à assurer 	CT	<ul style="list-style-type: none"> • Voir détails en Annexe • Développement de stockages bas coût • Développement de modes de gestion des stockages optimisés pour chacune des technologies et permettant d'assurer la sûreté et la fiabilité du stockage
Intégration Réseaux	<ul style="list-style-type: none"> > Gestion > Interaction réseau > Distribution sur le réseau 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • BMS et plus généralement Stockage Management System en lien avec le réseau et les conditions d'usages • Développement de stockages bas coût et management adapté, associé à production locale et autoconsommation pour les besoins de gestion dynamique du système (y compris l'exploitation des technologies existantes telles que les ballons d'eau chaude sanitaire, stockage de froid, ...) • Développement d'algorithme de gestion dynamique du système électrique incluant le stockage, en lien avec les besoins du réseau (énergie, puissance, tension, capacité, ...) et les marchés de l'énergie • Modèle optimisation taille/localisation (amont-aval compteur) selon les régions et leurs spécificités, centralisé vs décentralisé
Mobilité électrique	<ul style="list-style-type: none"> > Véhicules H2, batterie, hybrides tout électrique (V2G), incluant avion bateau (ship2grid) et ferroviaire (rail2grid) > Recharge des véhicules 	CT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptation des composants (vieillessement, performance, mode de fonctionnement, ...), intégration système, couplage au réseau • Reconnaissance des types de batteries et procédures de recharge adaptées en fonction des batteries et des possibilités (locales et dynamiques) du réseau • Définition des protocoles et standards de communication V2G; définition des conditions optimales d'utilisation de ce service V2G pour le réseau et pour les batteries (ou piles à combustible) du VE • Méthodes stochastiques d'analyse d'impact et lien exploitation-planification • Modélisation de modèle économique du V2G • Prise en compte de l'impact d'une production locale d'H2 par électrolyse (dimensionnement réseau)
Sûreté / Sécurité	<ul style="list-style-type: none"> > Connaissance limitée des risques associés à certains stockages d'énergie 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Via management adapté du système • Déploiement de moyens d'essais et études de compréhension des comportements des stockages en conditions extrêmes et en vieillissement
Modèles économiques	<ul style="list-style-type: none"> > Capacité à rendre plusieurs services au réseau 	CT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation des coûts pour rendre des services au système et donc coûts cibles ou des rémunérations complémentaires à envisager pour ces différents services • Évaluation des capacités des différents moyens de stockage à répondre aux besoins des réseaux et déterminer l'impact possible de ces services en termes de durées de vie des stockages

Voir en annexe le détail des verrous et des éléments de valeurs cibles des stockages



Verrous techniques 5 INTERDÉPENDANCES ENTRE INFRASTRUCTURES



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
Vulnérabilité du système	<ul style="list-style-type: none"> > Phénomènes de cascade > Éléments initiateurs ou déclencheurs 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation des interdépendances par approches topologiques et dynamiques • Modélisations par agents
Sécurisation des SoS (systèmes de systèmes)	<ul style="list-style-type: none"> > Interdépendances multi-infrastructures > Interdépendances multi-physiques > Interdépendances multi-échelles > Prise en compte des transitoires spécifiques à chaque infrastructure 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation des interdépendances par approches topologiques et dynamiques • Modélisation parcimonieuse sur les invariances d'échelles • Modélisation des systèmes hybrides et couplés • Modélisations dynamiques croisées entre réseaux
Prise en compte des incertitudes sur des paramètres des différentes infrastructures	<ul style="list-style-type: none"> > Multiplication des incertitudes > Hétérogénéité des incertitudes et de leur modélisation > Propagation des incertitudes > Quantification des risques 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Hybridations de méthodes stochastiques • Méthodes quantification et d'analyse de propagation des incertitudes sur des systèmes couplés • Modèles simplifiés incorporant les incertitudes • Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques sur des systèmes couplés dynamiques
Liens logiques	<ul style="list-style-type: none"> > Capacité à représenter une dimension logique sur des infrastructures de télécommunication et d'énergie 	MT	<ul style="list-style-type: none"> • Théorie des graphes complexes hybridée à des modélisations multi-domaines et infrastructures de type SGAM
Interactions socio-économiques avec les systèmes physiques	<ul style="list-style-type: none"> > Interdépendances multi-domaines > Interactions de stratégies industrielles et grand choix technologiques avec acceptabilité 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisations par agent • Théorie des jeux



Verrous techniques 6 INTERACTION ENTRE RÉSEAUX D'ÉNERGIE (1/2)



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
<p>→ Réseau électrique</p> <p>⇓</p> <p>les réseaux de gaz naturel</p>	<ul style="list-style-type: none"> > H2 : rendement et coût électrolyse > Injection dans les réseaux de gaz naturel / extraction réseau de gaz 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement d'électrolyseurs à bas coûts, haute pression, haut rendement → recherche sur matériaux d'électrodes, catalyseurs, stacks ; packaging et optimisation système • Développement électrolyseurs à haute température • Modélisation de l'introduction de flux d'hydrogène dans les réseaux de gaz, impact sur la sécurité des réseaux et recherche de module d'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz • Développement de méthodes d'extraction de l'hydrogène mélangées au gaz naturel (membranes sélectives, autres...) pour usages délocalisés de H2
	<ul style="list-style-type: none"> > H2 : marchés et nouveaux usages 	MT	<ul style="list-style-type: none"> • Étude marché et modèles économiques pour la valorisation de l'hydrogène dans différents usages : véhicules électriques, chimie, agro-alimentaire, méthanation, production électrique, ...
	<ul style="list-style-type: none"> > Rendement et coût procédé de méthanation 	LT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de procédés de méthanation à très haut rendement → nouveaux catalyseurs, réacteurs innovants (réduction taille, optimisation échange de chaleur, réduction des coûts) ; optimisation du contrôle-commande du process • Étude d'adaptation d'un procédé de méthanation à des variations importantes de charge (suivi de la production électrique)
	<ul style="list-style-type: none"> > Valorisation de la flexibilité par la méthanation et du CO₂ 		<ul style="list-style-type: none"> • Étude de l'impact de la taxe carbone et du bonus services système (apport de flexibilité au réseau électrique) sur la valorisation de l'hydrogène ou du méthane
<p>→ Réseau de gaz naturel</p> <p>⇓</p> <p>les réseaux électriques et thermiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Rendement et durée de vie des piles à combustible > Electrolyseur réversible > Rendement des composants de conversion : Cogénération 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Optimisation des piles à combustible haute température à reformage interne : réduction des coûts, augmentation fiabilité et durée de vie • Développement d'électrolyseurs réversibles capables de répondre en temps réel aux besoins du réseau électrique (délestage ou soutien) → optimisation matériaux, packaging, système, couplage avec stockage local H2 • Développement de cogénération haut rendement, bas coût et plus flexibles (biogaz)
	<ul style="list-style-type: none"> > Adaptation des marchés 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Réflexion autour de nouveaux modèles économiques couplant les réseaux électriques, thermiques et de gaz naturel • Étude technico-économique et ACV des couplages électricité-gaz



Verrous techniques 6 INTERACTION ENTRE RÉSEAUX D'ÉNERGIE (2/2)



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
<p>→ Réseau électrique</p> <p>⇓</p> <p>réseau chaleur / froid</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Rendement des composants de conversion : pompes à chaleur, stockages > Rendements des systèmes de conversion 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de pompes à chaleur (PAC) haut rendement et bas coût : PAC hautes températures, PAC pour bâtiments BBC, PAC pour production simultanée eau chaude et froide • Développements de systèmes hybrides performants (couplage plusieurs sources d'énergie) • Développement de stockage thermique haute température
	<ul style="list-style-type: none"> > Adaptation des marchés : valorisation de la flexibilité apportée par cette forme de stockage (excédents et pointes de production EnR, déficits et creux de production EnR) 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation du coût du service rendu au réseau électrique pour limiter les excédents/ pointes de production électrique et réciproquement les déficits / creux de production électrique • Réflexion sur les possibilités d'adaptations réciproques des marchés de l'électricité, de la chaleur et du froid, et modèles économiques / sociétaux associés, compte tenu entre autre des différences de valorisation actuelle du kWhélectrique, du kWhthermique et du kWhgaz
<p>→ Réseau de chaleur</p> <p>⇓</p> <p>réseau électrique</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Rendement et coût des composants : ORC, turbines > Optimisation des systèmes de couplage 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de turbines (vapeur, air chaud) de haut rendement (notamment pour réversibilité du stockage thermique haute température) • Développement de systèmes ORC innovants, bas coût, haut rendement, fiables et de faible encombrement • Couplage des systèmes de conversion chaleur/électricité avec la biomasse • Développements de produits électroménagers (lave-linge, lave-vaisselle) consommant directement de l'eau chaude, pour une meilleure efficacité énergétique
<p>→ Réseaux multi-vecteurs et territoires (villes et territoires intelligents)</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Gestion multi-vecteurs énergétiques > Importance des transitoires et dynamiques (horaire, ou à l'échelle de quelques jours) des différents réseaux et leurs impacts respectifs (sources fluctuantes) entre réseaux > Modèles économiques et sociologie des territoires > Caractère multi physiques, multi-infrastructures et multi-acteurs > Stratégies d'acteurs 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de couplages entre les modèles prenant en compte les dynamiques physiques et de marché propres aux différents réseaux d'énergie • Analyse des données temporelles de consommation, production et tendance des marchés des principaux réseaux d'énergie afin de faire émerger des méthodes d'anticipation • Méthodes de conception optimisées pour des systèmes couplés (multi-vecteurs), vers une conception intégrée pour une vision système (au contraire de la vision en silos). Ce type d'outil est à adapter aux différentes typologies de territoires ruraux et urbains. • Systèmes de monitoring global adaptatifs, en particulier pour les applications aux territoires et aux villes smart-cities, où réseaux de gaz, de chaleur et électrique peuvent se coupler intelligemment pour assurer l'équilibre offre/demande en énergie • Modèles économiques adaptés à la logique de gestion multi-vecteurs, multi-acteurs • Méthodes d'analyse des logiques d'acteurs au sein d'une perspective de territoire intelligent



Verrous techniques 7 SPÉCIFICITÉS DES RÉSEAUX DE CHALEUR/FROID (1/2)



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
<p>Intégration des sources EnR & adaptation aux bâtiments basse consommation</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Intégration des EnR intermittentes > Utilisation de chaleur fatale (industrie, eaux usées) de niveaux de températures et débits variables > Optimisation des composants 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> Optimisation de l'intégration de chaleur renouvelable (solaire thermique, chaleur fatale des bâtiments ou de l'industrie,...) par des approches nouvelles : configuration de réseaux, modes d'opération des réseaux, nouvelles connections, sous-stations, stockage, etc. Chaud : développement des complémentarités entre EnR, notamment en fonction de leurs saisonnalités respectives → développement de capteurs solaires thermique à haute performance (80-140°C) Froid : développement de technologies de froid haut rendement et bas coût, soit à partir de réseaux tempérés avec des PAC (groupe froid terminal), soit à partir de réseaux chauds (90-120°C, chaleur fatale incinération) → rafraîchissement local par groupe à absorption
<p>Stockages</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Selon taille et localisation possible > Stockage saisonnier 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> Stockages thermiques plus compacts et plus performants pour les différentes échelles utiles : quelques heures, à quelques mois, pour un bâtiment ou un quartier → développement de matériaux à changement de phase Stockage moyen long terme : développer les stockages par chaleur sensible de gros volumes type cuve ou fosse, ainsi que les stockages dans le sol (sonde géothermique) stockages thermiques plus compacts et plus performants : stockage thermo-chimique Couplage stockage et machine thermodynamique (groupe absorption ou PAC) afin d'augmenter les densités de stockage
<p>Réseaux de chaleur/froid</p>	<ul style="list-style-type: none"> > Réduire les pertes thermiques des canalisations (réseaux alimentant des éco-quartiers ou réseau de transport longue distance entre villages) > Réseaux basse température 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer l'isolation des canalisations et leur durée de vie → développement de nouveaux isolants ou procédés de mise en œuvre Intégrer des systèmes de détection de fuite et d'identification de leur positionnement afin de garantir les performances des canalisations Canalisations bas coût adaptées aux nouveaux réseaux basse température

QUELQUES EXEMPLES POUR ILLUSTRER :

Utilisation de la biomasse en base pour le réseau de chaleur :

en été les besoins sont insuffisants pour le taux de charge mini de la chaudière bois.

→ Le solaire thermique pourrait prendre le relais plutôt qu'une chaudière gaz.

Réseau électrique : production PV majoritairement en période estivale.

Or en été les cogénérations ne fonctionnent plus car le prix de l'électricité est trop bas.

→ Le solaire thermique pourrait donc venir remplacer du gaz.



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
Livraison de la chaleur/froid	<ul style="list-style-type: none"> > Optimisation des composants > Connectivité > Durabilité des performances et adaptation aux besoins > Compatibilité avec les réseaux basse température > Production décentralisée d'énergie thermique 	CT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de sous-stations plus performantes, plus intelligentes et connectées en lien avec un système de gestion du réseau de chaleur • Intégration de fonctionnalités avancées d'apprentissage, d'auto-adaptation des paramètres et de détection de défaut dans les sous-stations • Système de production d'eau chaude sanitaire à basse température et compatible avec les contraintes légionnelles afin de limiter la température des réseaux • Production d'énergie décentralisée avec réinjection sur le réseau → développement de sous-stations bidirectionnelles
Gestion des réseaux thermiques	<ul style="list-style-type: none"> > Manque outils de modélisation, planification énergétique, puis optimisation / gestion temps réel des sources > Manque approche dynamique, et connaissance des transitoires 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation dynamique du transport de chaleur / froid au sein des réseaux, dynamique des stockages. Mesures temps réel sur des réseaux existants • Développement d'outils de planification énergétique intégrant ces systèmes complexes • Développement d'outils de gestion de la puissance
	<ul style="list-style-type: none"> > Manque approche anticipative de la gestion 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de logiciels de commande prédictive, dont outils de prévision • Développement d'outils logiciels de services, dont le délestage aux heures de pointe
Observabilité	<ul style="list-style-type: none"> > Manque de connaissance des temps de transport 	MT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de réseaux de capteurs de température, pression et débit, en appui à la modélisation et pour une gestion optimisée des opérations • Traitement et analyse des données (capteurs, compteurs, sous-stations, ...) pour optimisation de la gestion, prévision de la demande, etc
Évolution des réseaux de chaleur vers les basses températures	<ul style="list-style-type: none"> > Adaptation à un environnement en évolution 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptation des réseaux actuels aux nouveaux quartiers et bâtiments basse consommation (sous-stations plus performantes, plus intelligentes et connectées, etc.) → développements de réseaux basse température et sous-stations adaptées • Réversibilité chaud/froid des réseaux et sous-stations • Réduction des pertes d'énergie dans le réseau



Verrous normatifs 8

NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
Échanges de données	<ul style="list-style-type: none"> > Standardisation des échanges de données entre parties prenantes → confidentialité, sécurité > Respect vie privée, confidentialité entreprise > Compteurs communicants > Compteurs multi-énergies > Compteurs divisionnaires > Autres systèmes de mesure 	CT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de cadres pour les échanges de données et pour les infrastructures ICT pour permettre/faciliter les échanges de services réseaux et d'équilibrages à l'échelle européenne (EEGI)
	<ul style="list-style-type: none"> > Choix des protocoles de communication pour les différents niveaux de la chaîne énergétique (de l'aval compteur jusqu'au contrôle-commande) 	CT	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche pour accompagner l'évolution des standards • Capitaliser sur le modèle SGAM
Conditions d'intégration des EnR	<ul style="list-style-type: none"> > Procédures de raccordement et d'interactions avec les réseaux standardisées 	CT	<ul style="list-style-type: none"> • Évolution des principes de raccordement des EnR (Smart connexion) en prenant en compte les possibilités de modulation de la production • Mise en place d'interfaces visant à mettre à disposition dynamiquement l'état des réseaux et les possibilités d'intégration des EnR
	<ul style="list-style-type: none"> > Droits et devoirs des producteurs vis-à-vis des réseaux clairement définis 	CT	<ul style="list-style-type: none"> • Participation des EnR au réglage de la tension par absorption ou fourniture de puissance réactive, évolution de la participation des EnR aux autres services système • Obligation de statisme des installations de production décentralisée (évolution des modalités de déclenchement des protections de découplage)
Sûreté et fiabilité des réseaux	<ul style="list-style-type: none"> > Identification et quantification des risques liés à l'échange de données 	CT	<ul style="list-style-type: none"> • Proposer une approche adaptée de la prise en compte des risques (et critères d'évaluation associés), basée sur une analyse statistique prenant en compte les corrélations du système de production électrique (EEGI)



Verrous réglementaires, économiques et de politiques publiques 9



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
► Tarification	<ul style="list-style-type: none"> > De l'usage des réseaux pour assurer les investissements court-moyen-long terme 	CT-LT	<ul style="list-style-type: none"> • Renforcer les outils de calcul de tarification assurant l'ensemble des investissements réseau, la recherche et la formation sur les réseaux tout en assurant le traitement équitable de l'ensemble des clients du réseau
► Coûts système & rémunération de la flexibilité	<ul style="list-style-type: none"> > Évaluation des coûts de défaillances et par conséquence des services rendus au réseau > Stockage : évaluation des services rendus au réseau: effacement de pointes de production comme de pointes de consommation, régulation tension, ... > Idem pour Effacement 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de critères d'évaluation basés sur les risques en terme de sécurité de fonctionnement pour l'investissement et la gestion des actifs et équipements (EEGI) • Outils de planification des maintenances et arrêts (EEGI)
► Modèles d'affaires	<ul style="list-style-type: none"> > Répartition des investissements entre les différentes parties prenantes, y compris les (nouveaux et futurs) offreurs de service (via web par exemple) > Responsabilités fragmentées entre un (futur) grand nombre d'acteurs > Modèles d'affaires difficiles à déterminer et très dépendants des politiques réglementaires et tarifaires > Décalage entre le partage actuel des coûts et bénéfices entre les acteurs (régulés et dérégulés) 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser et tester des modèles de marchés qui permettent l'intégration des EnR, du stockage et autres flexibilités (dont l'effacement) • Modélisation de nouveaux modèles économiques et réglementations associées, y compris modèles d'affaires pour des échelles locales • Idem pour tarifs de l'électricité dont ceux d'utilisation des réseaux (EEGI) • Modéliser des stratégies pour limiter les risques de congestion dans contexte de marché européen de l'électricité (EEGI)
► Politiques publiques	<ul style="list-style-type: none"> > Quelles politiques pour encourager la MDE et les effacements, la modulation de la consommation en préservant la valeur système ? > Quelles politiques publiques pour préserver les outils de flexibilité en production et de sécurisation du réseau dont la rentabilité se réduit ? > Quelles politiques publiques pour encourager l'autoconsommation avec une coordination système (optimisation) ? 	CT-MT	<ul style="list-style-type: none"> • Modéliser et tester des mécanismes d'incitation tarifaire et tarification des réseaux facilitant l'intégration des EnR et le développement du stockage et autres flexibilités (EEGI) • Modéliser et tester des réglementations facilitant et encourageant l'autoconsommation, voire le couplage avec du stockage locale • Définir et développer des mécanismes pour des services d'équilibrage transfrontalier → encourager de nouveaux acteurs trans nationaux (agrégateurs, centrales virtuelles, ...)



Verrous organisationnels et sociétaux 10



NATURE	DESCRIPTION	PRIORITÉ	AXES R&D
<p>► Organisation de la filière</p>	<ul style="list-style-type: none"> ► Évolution du rôle des Collectivités ► Place des PME-ETI dans la filière 	<p>CT-MT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Benchmark avec les Stadtwerke Allemandes : avantages et inconvénients de ce type de structure de production et gestion locale de l'énergie, afin d'éclairer les politiques publiques • Travaux sur les forces et faiblesses de la France pour le développement des PME et ETI dans ces domaines (rôle notamment des entreprises en situation de quasi-monopole de la commande publique, ...)
<p>► Des coûts d'intégration des EnR sur les réseaux et des différents services de flexibilité</p>	<ul style="list-style-type: none"> ► Difficulté à évaluer les coûts réels de l'insertion des ENR dans les réseaux ► Difficulté à évaluer l'impact et la valorisation des services de flexibilité 	<p>CT-MT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Études technico- économiques pour apporter des méthodes d'évaluation fiables et neutres <ul style="list-style-type: none"> → des coûts d'intégration des EnR variables, avec prise en compte des externalités positives et négatives → des coûts intrinsèques et de la valeur apportée par les différentes formes de flexibilité et de soutien aux réseaux, tant la puissance active que réactive (effacement, foisonnement, stockage, CCG, changement de vecteur énergétique, V2G, gestion des onduleurs et machines tournantes,...)
<p>► Société-acteur « actif »</p>	<ul style="list-style-type: none"> ► Évolution vers l'autoconsommation ► Déploiement d'équipements multi-énergie (μ-cogen gaz, PAC, ...) ► Attentes du consommateur / acteur, questions d'ergonomie ► Appropriation des nouveaux équipements et services, notamment pilotage par un tiers ► Durée de vie des changements de comportements et évolution des courbes de charge ► Précarité énergétique 	<p>CT-MT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Protection des données personnelles • Développements de nouveaux modèles économiques autour du demand-response (flexibilité) et autour de l'autoconsommation, • Étude de l'impact sociologique des nouvelles manières d'appréhender production / consommation / effacement d'énergie • Étude des comportements « efficacité énergétique » et gestion des usagers de l'énergie sur plusieurs années → impact sur politiques publiques et de communication • Réflexion sur l'autoconsommation comme méthode pour limiter la précarité énergétique
<p>► Verrous environnementaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> ► Évaluation de la réduction des émissions de CO2 ► Impact sur la consommation de matériaux critiques 	<p>MT-LT</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Réflexion sur les critères et moyens objectifs de mesure de la réduction des émissions de CO2, ainsi que de valorisation du CO2 (voies chimiques ou biologiques) • Évaluation des besoins en matériaux nécessaires à la réalisation des nouveaux composants énergétiques, dont les composants et systèmes de production renouvelable et de stockage • Développement de matériaux alternatifs bas carbone ; avec notamment l'appui de la bio-ingénierie

+ Annexe 1 VERROUS TECHNIQUES STOCKAGE : DÉTAIL DES VERROUS ET CIBLES DE COÛTS (1/3)



MODE DE STOCKAGE	TYPE DE VERROUS	SOLUTION MATÉRIAU	PERFORMANCE À ATTEINDRE	OBJECTIFS DE COÛT (SET PLAN 2030)
H2 solide	<ul style="list-style-type: none"> > Capacité de stockage massique. > Température de décharge > Durabilité. Augmentation de la cyclabilité (10000 cycles) > Réduction des coûts. 	<ul style="list-style-type: none"> • MOF • Hydrure métalliques et hydrures (Mg, Mn, alliages avec Al, Ti, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> 9.0 wt% H2 et 81 g H2/l en 2015 (2012 : 6% et 45g/l) 	< 100 €/kg H2
H2 liquide	<ul style="list-style-type: none"> > Matériaux de réservoir bas coûts 	<ul style="list-style-type: none"> • Catalyse pour la conversion Méthane 	<ul style="list-style-type: none"> P > 700 bars 	< 300 €/kg H2
Piles à combustible PEM	<ul style="list-style-type: none"> > Coût > Durabilité > Gamme température 	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode, Electrolyte solide HT 	<ul style="list-style-type: none"> 0-2 A.cm-2 80 – 120 °C 1 -350 bar 50 000h 	50 €/kW
Piles à combustible SOFC	<ul style="list-style-type: none"> > Coût > Durabilité > Gamme température 	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode, Electrolyte solide TI 	<ul style="list-style-type: none"> 0-1 Acm-2 700°C 1-30 bar 10000h 	100 €/kW
Batteries Li-ion	<ul style="list-style-type: none"> > Cyclabilité > Densité de puissance/Energie > Température de fonctionnement. > Sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> • Lamellaires surlithiés (Lirich) • Silicium et composites • Spinelles 5V • Post LTO • Polyanions (Fe/Mn-PO4 Fluorophosphate, ...) 	<p>MODE ENERGIE</p> <ul style="list-style-type: none"> ca. 180-400 Wh/kg 350-1000 Wh/L Safe > 10000 cycles -20, +70 °C <p>MODE PUISSANCE</p> <ul style="list-style-type: none"> 170-220 Wh/kg > 5 kW/kg > 15 years -20, +70 °C 	<p>MODE ENERGIE</p> <ul style="list-style-type: none"> ca 200 €/kWh (or 10 c€/kWh/cycle) i.e. phosphates < 10 €/kg or lamellar oxides < 20 €/kg <p>MODE PUISSANCE</p> <ul style="list-style-type: none"> ca 20 €/kW i.e. LTO < 10 €/kg

Les valeurs des tableaux suivants –qui datent pour la plupart de fin 2013- sont sujettes à des variations rapides en raison des progrès techniques et / ou de l'ouverture des marchés ; elles sont donc à prendre avec précaution et à réactualiser à l'aide de la littérature avant usage.

+ Annexe 1 VERROUS TECHNIQUES STOCKAGE : DÉTAIL DES VERROUS ET CIBLES DE COÛTS (2/3)



MODE DE STOCKAGE	TYPE DE VERROUS	SOLUTION MATÉRIAU	PERFORMANCE À ATTEINDRE	OBJECTIFS DE COÛT (SET PLAN 2030)
Metal – air (Mg, ...)	<ul style="list-style-type: none"> > Cyclabilité > Coût 	<ul style="list-style-type: none"> • Catalyseur • Matériaux cathode, anode, électrolyte 	<ul style="list-style-type: none"> – > 600 Wh/kg – > 500 cycles – Rendement E > 80% 	300-500 €/kWh
Lithium Soufre	<ul style="list-style-type: none"> > Autodécharge > Cyclabilité > Sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux cathode, anode, électrolyte 	<ul style="list-style-type: none"> – 500 Wh/kg – > 500 cycles 	< 350 €/kWh
Supercondensateur	<ul style="list-style-type: none"> > Capacité > Température > Stabilité > Autodécharge 	<ul style="list-style-type: none"> • Electrolytes pour U> 2.7 V • Stabilité Electrolyte 4.5 – 5 V • Hybride aqueux 	<ul style="list-style-type: none"> – T < -40°C – > 100000 cycles – > 10 -15 Wh/kg 	<ul style="list-style-type: none"> 3 €/Wh 0.3 €/W
Batteries Redox flow (Vanadium, ZnBr ₂) 10-20Wh/kg – 15-25Wh/L (Vanadium)	<ul style="list-style-type: none"> > Mécanismes de dégradation. > Augmentation densité d'énergie > Coût > Rendement global > Sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> • Couples électrochimiques • Formulation d'encre (particules en suspensions) 	<ul style="list-style-type: none"> – Gen2 Vanadium Bromide – 20-40Wh/kg – T° > 100°C 	<ul style="list-style-type: none"> Coût énergie 120 €/kWh Coût puissance 300 €/kW
Volant d'inertie	<ul style="list-style-type: none"> > Réduction friction haute vitesse de rotation > Coût 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux composites renforcés (fibres, en particulier) 	<ul style="list-style-type: none"> – Energie stockée > 10 kWh, et densité d'énergie > 100Wh/kg 	< 3000 €/kWh
STEP	<ul style="list-style-type: none"> > Composant électronique de puissance > Amélioration de l'efficacité des turbines 	<ul style="list-style-type: none"> • Revoir la conception des matériaux dont possibilité de STEP marine 	<ul style="list-style-type: none"> – Amélioration de l'efficacité – Variabilité pour couplage réseau HVDC 	< 350 €/kWh

+ Annexe 1 VERROUS TECHNIQUES STOCKAGE : DÉTAIL DES VERROUS ET CIBLES DE COÛTS (3/3)



MODE DE STOCKAGE	TYPE DE VERROUS	SOLUTION MATÉRIAU	PERFORMANCE À ATTEINDRE	OBJECTIFS DE COÛT (SET PLAN 2030)
CAES	<ul style="list-style-type: none"> > Capacité > Conductivité > Dégradation > Conteneur de surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux pour stockage HT stables, résistants, bon marché, résistant à la pression contraintes thermiques • Matériaux isolants thermiques pour enveloppe 	<ul style="list-style-type: none"> — P > 200-300 bars — Gradients T° > 600°C 	<ul style="list-style-type: none"> — Coût unité < 20 à 30€/kWh
Stockage thermique	<ul style="list-style-type: none"> > Densité d'énergie > Conductivité > Pertes > Disponibilité ressource (nitrates) > Vieillessement > Nouvelles applications bâtiments et industries > Coût 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux changement de phase bas coût • Augmenter T° sels fondus • Sels fondus autres que nitrates • Baisser point de solidification • Nouvelles céramiques (issu déchet solides) 	<ul style="list-style-type: none"> — T stockage > 1000°C (solaire concentré) — Très fort besoin de recherche 	<ul style="list-style-type: none"> — Réduction des coûts investissement de la récupération de chaleur < 100€/kWh — Système compact thermochimique < 50€/kWh. — Système de stockage HT (< 400°C) avec solaire concentré 40€/kWh
Stockage magnétique (SMES)	<ul style="list-style-type: none"> > Sécurité > Coût > Basse température 	<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement à H2 liquide • Supraconducteurs à plus haute T° (dt MgBr2) • Revêtements SC sur conducteurs = haute T° • Réservoirs LH₂ 	<ul style="list-style-type: none"> — 0.1 à plusieurs GWh — Cycles > 10⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> — 750 500-750 €/kW et 2-3 €/kWh basé sur le SMES et l'énergie pour LH₂

SIGLE	SIGNIFICATION
AC-DC	Conversion courant alternatif/continu
ACV	Analyse de Cycle de Vie
BMS	Battery Management System
CPL G3	Compteurs communicants par CPL (Courant Porteur en Ligne) de 3 ^{ème} génération
DLD	Détection Localisation de Défauts
EEGI	European Electricity Grids Initiative
EMS/DMS	Energy Management system/Distribution Management System
EP	Electronique de Puissance
FACTS	Flexible Alternative Current Transport System
HTA	Haute Tension A
MT-BT	Moyenne, Basse Tension
ICT	Information & Communication Technologies
IHM	Interface Homme Machine
MDE	Maîtrise De l'Energie
MTDC	Multi-terminal DC network
ORC	Organic Rankin Cycle
SCOT	Schéma de Cohérence Territoriale
SGAM	Smart Grid Architecture Model
V2G	Vehicule to Grid: interaction véhicule-réseau
VE	Véhicule électrique
VHR	Véhicule Hybride Rechargeable
WACS	Wide Area Control System
WAMS	Wide Area Management System



+ Annexe 3 MEMBRES DU GP10

NOM	PRÉNOM	ORIGINE
> BARRUEL	Franck	CEA
> BRAULT	Pascal	CNRS
> CZERNICHOWSKI	Isabelle	BRGM
> DEMISSY	Michel	Ineris
> DESBATS	Philippe	CEA
> DIDIERJEAN	Sophie	ENSEM
> HADJSAÏD	Nouredine	G2ELab
> MERMILLIOD	Nicole	CEA
> MORICE	Ronan	LNE
> PETIT	Marc	Supelec
> PONSOT-JACQUIN	Catherine	IFPEN
> PY	Xavier	Université Perpignan
> VANNIER	Jean-Claude	Supelec





Consortium de Valorisation Thématique



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie