

ATEE – Tour Eve, 1 Place du Sud – CS 20067  
92800 – Puteaux

Auteurs : Membres du GT Économie du Club Stockage d'Énergies

Contact : Patrick Canal – Délégué général  
01 46 56 41 47 – patrick.canal@atee.fr

# ÉTUDE DES POTENTIELS NATIONAUX DES STOCKAGES D'ÉNERGIES ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE (Étude PEPS<sub>5</sub>)

Cahier des clauses techniques générales (CCTG)

Édition du 24 Août 2021

1. OBJET	2
2. FINALITÉS DE L'ÉTUDE	2
3. évolutions du CONTEXTE À PRENDRE EN COMPTE POUR L'ÉTUDE	3
3.1. pour les Stockages d'électricité et le P2G	3
3.2. pour le Stockage thermique et le power-to-heat	8
4. MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	12
4.1. Approche globale	12
4.2. Analyse de la valeur du stockage d'un point de vue sociétal	13
5. RÉCAPITULATIF DE L'ENSEMBLE DES LIVRABLES ATTENDUS POUR L'ÉTUDE	18
6. PRESTATIONS OPTIONNELLES (À CHIFFRER EN COMPLÉMENT ET SÉPARÉMENT)	18
6.1. Actualisation d'un benchmark des principaux pays qui développent le stockage sur les cas d'études traités	18

6.2. Analyse des solutions de flexibilité en courant continu et place du stockage dans ces solutions	19
6.3. Analyse de la seconde vie des batteries	19
6.4. Prise en compte de l'impact de l'économie circulaire dans les modes de valorisation	19
7. PÉRIMÈTRES ET SCÉNARIOS DE MODÉLISATION	19
7.1. Pour le parc de production électrique	19
7.2. Pour les enquêtes sectorielles	20

## 1. OBJET

L'objet du présent marché est la réalisation d'une prestation d'études (dénommée ci-après PEPS<sub>5</sub>), visant à évaluer les potentiels nationaux de stockages d'électricité, de chaleur et de froid (incluant P2H et P2G).

## 2. FINALITÉS DE L'ÉTUDE

Cette étude doit permettre de répondre à la problématique suivante :

« Avec quelles technologies et applications, comment et à quels niveaux les solutions de stockage d'énergies (électricité, chaleur, froid, power to gas, power to heat<sup>1</sup>) apportent-elles à la collectivité des externalités :

- **Réseaux**, en évaluant l'apport en termes de flexibilité, de résilience et de synergies des différents systèmes énergétiques (électricité, chaleur, froid, gaz) ;
- **Environnementales**, en abaissant le coût du CO<sub>2</sub> évité et en accroissant le taux de pénétration des EnR dans le mix énergétique français ;
- **Énergétiques**, en améliorant l'efficacité énergétique et la sobriété de consommation d'électricité et de chaleur ;
- **Économiques**, en améliorant notamment les coûts pour la collectivité des différents cas d'application considérés ;
- **Sociétales**, en termes d'acceptabilité des différents cas d'études et de création d'emplois non délocalisables et en renforçant la place des acteurs français sur la filière ?

Dans le cadre de cette nouvelle étude reposant comme pour les quatre études PEPS (*Programme d'études sur les potentiels de stockage*) précédentes sur l'analyse des coûts et des bénéfices pour la collectivité, il s'agit donc de qualifier et de quantifier les applications de stockages les plus pertinentes pour répondre aux différents objectifs fixés par la Loi Énergie Climat et déclinés dans la PPE (*Programmation pluriannuelle des investissements*), notamment en termes de :

1. Flexibilités (*locale et nationale*),
2. Capacité à accélérer l'intégration des ENR&R en stockant mieux les surplus de production et donc en augmentant le productible EnR&R,
3. Capacité à optimiser les couplages des différents réseaux multi-énergies : PTH , PTG, HTP, etc.,

---

<sup>1</sup> Le terme stockages pris au pluriel se référera dans le reste du document à l'ensemble de ces énergies.

4. Résilience et de réduction des coûts de développement des réseaux énergétiques (*électricité, chaleur, froid*),
5. Sobriété et d'efficacité énergétique (*économies d'énergies primaire d'origine fossile*),
6. Efficacité environnementale, qui inclut le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée,
7. Création d'emplois et compétitivité pour les filières industrielles française, dont celle du stockage (*incluant notamment la mobilité électrique*).

### 3. ÉVOLUTIONS DU CONTEXTE À PRENDRE EN COMPTE POUR L'ÉTUDE

#### 3.1. POUR LES STOCKAGES D'ÉLECTRICITÉ ET LE P2G

En 2018, la baisse des coûts des énergies renouvelables intermittentes et des technologies de stockage (*notamment batteries*) et de power-to-gas (*notamment électrolyseurs*), ainsi que l'augmentation des besoins de flexibilité constatée dans les différents scénarios du Bilan Prévisionnel 2017 de RTE, qui avaient été retenus pour l'étude PESP<sub>4</sub>, ont motivé **l'ADEME et les membres des Clubs Stockage d'Énergies et Power to Gas de l'ATEE** à lancer les études PEPS<sub>3</sub> et PEPS<sub>4</sub>.

L'étude PEPS<sub>4</sub>, commanditée par le Club Stockage de l'ATEE et l'ADEME et réalisée par Artelys en partenariat avec le CEA-Liten et ENEA Consulting, a notamment permis d'analyser les coûts et bénéfices d'investissements potentiels dans des technologies de stockage d'électricité et de power-to-gas en France métropolitaine. La méthodologie reposait sur la détermination des valeurs de stockages d'électricité et de P2G en France métropolitaine et dans les ZNI, pour une dizaine de cas d'études jugés pertinents, avec une approche globale d'évaluation des coûts/bénéfices pour la collectivité.

Ces évaluations ont été réalisées suivant différents scénarios de mix énergétique 2035 proposés par RTE dans son bilan prévisionnel 2017.

Ces études ont révélé la pertinence des solutions de stockage dans une dizaine de cas d'application pour chaque filière de stockage d'électricité ou de chaleur.

NB : Pour plus d'informations, on se référera aux deux rapports d'études disponibles sur les sites internet de l'ADEME et de l'ATEE accessibles aux liens respectifs suivants : [RapportPEPS<sub>3</sub>\\_version7.docx \(attee.fr\)](#) et [Etude PEPS<sub>4</sub> sur le potentiel national du stockage d'électricité et du power-to-gas \(attee.fr\)](#).

En janvier 2019, dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie pour la période 2019-2023, le gouvernement a proposé de nouveaux objectifs chiffrés pour le système électrique français, incluant des trajectoires pour 2023 et 2028 de nature à influencer l'essor du stockage d'électricité et du P2G.

En effet, les objectifs de déploiement des nouvelles capacités d'ENR électriques, notamment pour le solaire PV, sont du même ordre ou supérieurs aux capacités des scénarios de RTE les plus favorables aux EnR (Ampère et Watt) comme l'illustre la figure 2 ci-après.

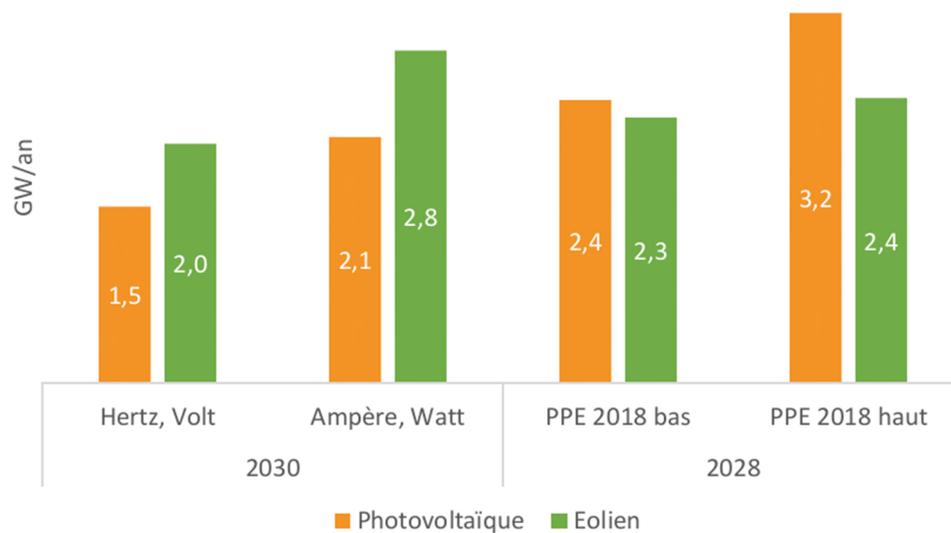


Figure 1 : Comparaison des rythmes de nouvelles capacités installées en PV et éolien des scénarios du Bilan Prévisionnel 2017 (utilisés dans PEPS<sub>4</sub>) à horizon 2030 et des scénarios de la PPE 2018 à horizon 2028, en GW par an à partir de 2016 (source : Artelys, RTE, PPE)

Ces hypothèses de production et de consommation électriques conduisent à des mix de production semblables à ceux du scénario Volt à l'horizon 2030, reposant fortement sur le nucléaire et les EnR et très faiblement sur les productions thermiques fossiles, comme l'illustre la Figure 3 ci-après (segmentation des productions des différents scénarios de la PPE à l'horizon 2028 et du Bilan Prévisionnel à l'horizon 2030).

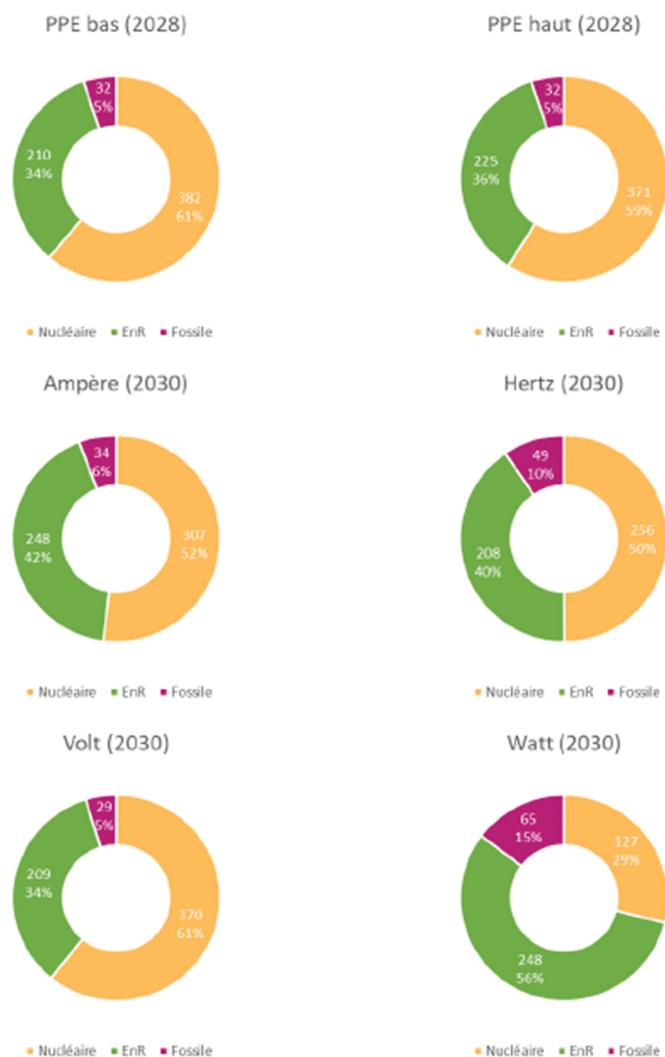


Figure 2 : Répartition de la production d'électricité (en TWh et en %) dans les scénarios PPE (à l'horizon 2028) et BP (à l'horizon 2030) (source : Artelys, RTE, PPE)

Pour le Stockage d'électricité et le P2G, la PPE semble inscrire le développement des énergies renouvelables dans une dynamique similaire ou supérieure à celle du scénario Ampère, mais le déclassement du parc nucléaire proposé est plus lent et s'apparente plus à la trajectoire de Volt. Ceci est susceptible de créer des surplus d'énergie à faible coût marginal (EnR et nucléaire) et des besoins de flexibilité supérieurs à ceux identifiés dans les scénarios du Bilan Prévisionnel de 2017.

De surcroît, la substitution de puissance éolienne à de la puissance photovoltaïque augmente les besoins de flexibilité infra-journalière, ce qui pourrait également accroître les opportunités pour les stockages de quelques heures.

Ainsi, par rapport aux scénarios du Bilan Prévisionnel étudiés dans PEPS<sub>4</sub>, les scénarios de la PPE pour la période 2019-2023 semblent proposer des opportunités supplémentaires pour le stockage d'électricité et le P2G, qu'il devient nécessaire de quantifier. D'autre part, RTE devrait publier en 2021 la prochaine édition de son bilan prévisionnel reposant sur de nouveaux scénarios établis à horizons 2035 et 2050. Ces nouveaux scénarios devraient être de nature à renforcer la part des EnR dans le mix électrique de la seconde période de PPE notamment.

### 3.1.1. Autres éléments à prendre en considération

Il est demandé pour cette nouvelle étude de :

#### a) Prendre en compte de nouveaux scénarios de référence

Il est pertinent de prendre en compte certains des nouveaux scénarios qui sont de nature à accélérer la part des EnR (électriques et thermiques) dans les mix de production d'énergies, facteur favorable aux différents stockages.

Les scénarios dont il convient d'analyser l'intérêt sont les suivants : RTE (BP 2021), TYNDP2020, PPE (pour les trajectoires EnR électriques et thermiques en France), plan hydrogène (pour la trajectoire H2). Le prestataire devra en analyser l'intérêt dans son offre, ainsi que les limites.

**Le choix du/des scénario/s les plus représentatifs sera arrêté en tout début d'étude par les membres du Comité de pilotage de l'étude, désigné ci-après par « Copil », en concertation étroite avec le prestataire qui aura été retenu.**

#### b) Actualiser les cas d'étude qui ont bénéficié depuis 2018 de baisses sensibles de Capex/Opex et/ou d'un relèvement de leurs performances

Il s'agit notamment des cas d'étude mettant en œuvre des batteries, dont les coûts ont continué de chuter depuis 3 ans, pour de nombreux cas d'application : VE, Autoconsommation collective, ASI, site isolé, ZNI,...

À titre d'indication, la **Figure 3** : Cas d'études de l'étude PEPS<sub>4</sub> rappelle les différents cas d'études qui avaient été traités dans l'étude PEPS<sub>4</sub>.

### Analyse de plusieurs cas d'étude, à la marge de scénarios référents.

L'étude s'intéresse à la valeur du stockage et du power-to-gas pour la collectivité, calculée par modélisation et simulation des systèmes énergétiques avec Artelys Crystal dans chacun des cas



Figure 3 : Cas d'études de l'étude PEPS<sub>4</sub>

### c) Compléter les différents cas d'étude et les modes de valorisation abordés dans PEPS<sub>4</sub>

#### La proposition doit privilégier les approches suivantes :

- Modéliser une grille de compétition entre énergies pour la filière stockage (notamment vs hydrogène et gaz verts) :
  - *Il sera intéressant de voir dans quelles situations les stockages batterie restent compétitifs à l'horizon 2030, ou si cette technologie se dessine plus comme une technologie « de transition » vers l'hydrogène ;*
- Évaluer des cas de solutions hybrides (couplage d'une production d'électricité d'origine EnR et d'un stockage), suivant une taille et une segmentation à proposer ;
- Évaluer les cas d'application et les modes de valorisation complémentaires qui ont pu survenir ou évoluer depuis 2018, comme :
  - *L'autoconsommation avec stockage aval compteur ;*
  - *Le V2G (déjà traité dans PEPS<sub>4</sub> mais peu approfondi), à actualiser avec l'impact de la mise en vigueur de la loi de mobilité ;*
  - *Une combinatoire des différents marchés dérégulés (FCR, AFFR, capacité, MA-ME, ...) en analysant leurs contraintes et leurs limites. Ce point est extrêmement important, d'autant plus que les acteurs de la filière s'accordent sur la nécessité de combiner les valorisations de différents marchés pour consolider le modèle d'affaire du stockage. Cette optimisation n'a pas suffisamment été abordée dans l'études PEPS<sub>4</sub>. De fait, certains de ces marchés, notamment FCR, AFFR, MA-ME se sont étoffés depuis et fait l'objet de méthodologies proposées par la CRE et les gestionnaires de réseaux.*

### d) Analyser l'impact des obligations liées à l'économie circulaire dans les modèles d'affaire pour les cas d'études abordés

Dans le cadre d'une analyse de sensibilité sur le coût et les performances des batteries pour les cas d'études à préciser (et retenus par le CODIR en début d'étude), il s'agira notamment d'intégrer la seconde vie des batteries et l'impact de leur recyclabilité, notamment avec les obligations liées à l'actualisation de la réglementation européenne en vigueur.

### e) Prendre en compte de nouveaux cas d'études se révélant pertinents pour l'atteinte des principaux objectifs de la PPE 2023-2028

Les cas possibles doivent être proposés par le prestataire et feront l'objet d'une concertation avec les membres du Copil. On peut par exemple :

- Extrapoler les performances annoncées des prochaines générations 4 de batteries Li-ion, par le biais d'analyses de sensibilité ;
- Rechercher d'autres technologies de batteries ou de technologies de stockages que les batteries Li-ion, très majoritairement prises en compte pour les différents cas de l'étude PEPS<sub>4</sub>.

#### Informations utiles pour le chiffrage de la prestation :

- *En première analyse, nous proposons de chiffrer 8 cas d'étude pour l'étude du stockage d'électricité, soit le même nombre de cas que pour l'étude PEPS<sub>4</sub>. Une évaluation de cas complémentaires, s'ils se révélaient pertinents pour cette étude, peut toutefois être suggérée dans la proposition mais de façon optionnelle, dans la mesure où leur coût peut conditionner les choix du Copil.*

**Lors de la réunion du GT Économie du 3 juin 2021, les cas d'études suivants ont été pré-qualifiés :**

1. **Stockage centralisé avec STEP, batteries (métropole et ZNI) :** 2 cas potentiels (avec détermination des coûts complets)

**Mailles distribuée/diffuse :**

2. **ASI** (sur site industriel) : 1 cas
3. **ZNI** : 1 cas
4. **Power to gas to power** (e/H<sub>2</sub>/e) : 1 cas
5. **V2X** : 1 cas
6. **Autoconsommation** : 2 cas potentiels (collective, individuelle)
7. **Actifs de stockage hybrides** : 1 cas

**Soit potentiellement 8 à 9 cas pré-qualifiables.**

**In fine, l'identification et la caractérisation détaillée des différents cas d'études feront l'objet d'une concertation des membres du Club lors de la première réunion de lancement de l'étude, sur propositions du prestataire. Il en sera de même pour l'établissement du-des différents scénarios énergétiques et des scénarios de prix à retenir pour l'étude.**

**À l'issue de cette étape, le choix de cas et des scénarios « contractuels de l'étude » sera arrêté lors d'une réunion de Copil spécifique au démarrage de l'étude.**

- Dans tous les cas, il sera nécessaire que le rapport PEPS<sub>5</sub> indique la raison pour laquelle tel ou tel cas abordé dans PEPS<sub>4</sub> n'a pas été retenu et pourquoi de nouveaux cas ont été sélectionnés par rapport à cette précédente étude.
- Dans l'interprétation des résultats de l'étude, il s'agira également de faire clairement ressortir les enjeux nationaux que présentent telles ou telles solutions retenues (par exemple, peut-il y avoir un impact du stockage sur les volumes d'interconnexion, sur les importations d'électricité d'origine fossile, etc. ?). Ces points seront débattus lors des réunions de synthèses entre le prestataire et le Copil.

## 3.2. POUR LE STOCKAGE THERMIQUE ET LE POWER-TO-HEAT

### 3.2.1. Plusieurs cas d'études pertinents ont été révélés par la première étude PEPS<sub>3</sub>

Avec plus de 50 % de la totalité de l'énergie consommée en France sous forme de chaleur (*habitat, industrie, énergie*) et l'accroissement des besoins de flexibilité et d'intégration des EnR électriques (notamment pour la production de froid négatif) et thermiques, la filière du stockage thermique (c'est-à-dire de chaleur et/ou de froid) et du power to heat représente un atout stratégique évident.

Ces 10 dernières années, plusieurs études technico-économiques (en France avec l'étude PEPS<sub>3</sub> menée en 2016, mais aussi en Belgique, au Danemark, en Suède, en Suisse, ...) ont démontré que le recours au stockage thermique représentera un levier important pour optimiser et réduire les coûts et impacts environnementaux des réseaux multi-énergies. Pourtant, alors que les projets de stockage de froid

se généralisent rapidement à l'étranger<sup>2</sup>, leur développement en France reste discret malgré leur intérêt.

Le Grand Défi pour la France doit consister à réussir le couplage entre les différents réseaux multi-énergies, en garantissant les meilleures synergies possibles, ce qui est faiblement réalisé voire ambitionné à ce jour.

Les solutions de stockage thermique ouvriront 6 grands marchés, dans les domaines suivants :

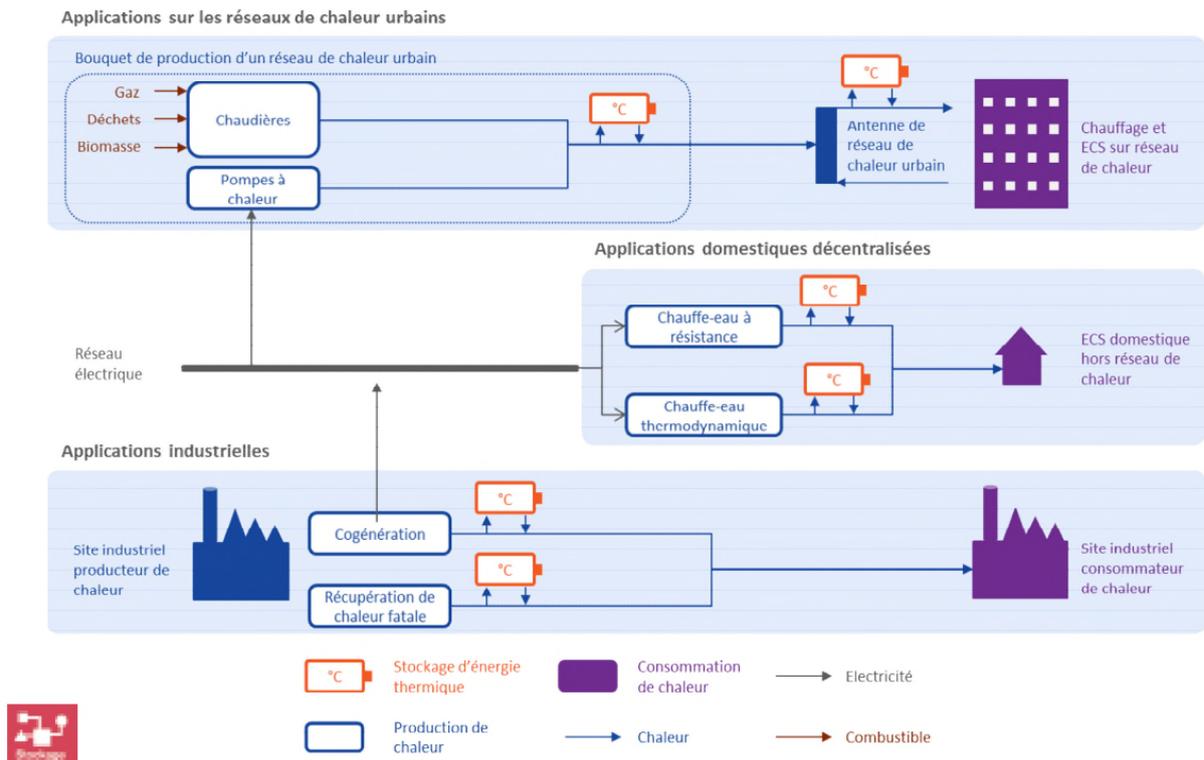
- Récupération de chaleur à partir de sources de chaleur mixtes (*carbonées et non carbonées*) ;
- Récupération de chaleur décarbonée à partir de sources de chaleur fatale industrielle ou solaire (*Heat to Heat*) ;
- Production de chaleur décarbonée à partir d'électricité partiellement ou totalement décarbonée (*Power to Heat*) ;
- Production d'électricité décarbonée à partir de chaleur fatale industrielle (*Heat to Power*) ;
- Production d'électricité décarbonée par conversion thermoélectrique à partir d'électricité renouvelable (*Power to Heat to Power*) ;
- Réseaux intelligents multi-énergies (*chaud/froid/gaz/électricité*), durables et rentables pour les marchés de la flexibilité ;
- Stockages thermiques intersaisonniers utilisant des sources EnR&R (*UIOM, géothermie, nucléaire...*).

L'étude PEPS<sub>3</sub> mentionnée précédemment n'a finalement pu aborder que les trois premières applications, et encore, seulement en partie.

La figure suivante rappelle à ce sujet les principaux cas d'étude qui avaient été étudiés par PEPS<sub>3</sub> :

---

<sup>2</sup> Le département américain de l'énergie (DOE) recense à cet effet de nombreux projets de stockage de froid à travers le Monde.



### 3.2.2. Une évolution de la PPE qui renforce l'intérêt du stockage thermique et du P2H

La Loi Énergie Climat (LEC) pour la période 2023-2028 fixe l'objectif à l'horizon 2030 de multiplier par cinq la quantité de chaleur et de froid EnR&R délivrée par les réseaux de chaleur et de froid.

Cette croissance sera portée par l'augmentation de la part des EnR&R dans les réseaux de chaleur (*obligation actuelle de 50% pour obtenir un taux de TVA réduit*), par des extensions de réseaux existants où par la construction de nouveaux réseaux. L'étude PEPS<sub>3</sub> a mis en lumière que le stockage thermique et le power-to-heat sont et seront plus encore des solutions à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs, notamment en couplage avec des productions de chaleur renouvelables ou récupérables.

Dans ce contexte, il devient pertinent d'actualiser les cas de stockages thermiques et de P2H existants, compte tenu de l'évolution des performances et des Capex dont certaines technologies ont pu bénéficier (*notamment en P2H*), en intégrant les nouveaux scénarios énergétiques et les études complémentaires qui ont été menées depuis l'étude PEPS<sub>3</sub>, notamment par l'ADEME sur la récupération de chaleur fatale.

Ces cas sont les suivants :

#### 1. Cas d'études complémentaires avec de nouvelles filières de stockage thermique

La prise en compte de nouvelles applications et de nouvelles technologies fait sens sur les filières suivantes :

- Stockage de froid ;
- Stockage souterrain avec pompe à chaleur ;
- Nouveaux stockages mettant en œuvre des matériaux à changement de phase ;
- Stockage thermochimique.

## 2. Cas d'études mettant en œuvre des couplages multi-réseaux électricité/chaleur/froid

- Nouveaux réseaux intelligents associant des productions d'électricité et de chaleur/froid, combinant éventuellement des stockages hybrides et/ou mettant en œuvre différentes technologies complémentaires de stockage ;

### 3.2.3. Cas et scénarios énergétiques à retenir

#### 1. Cas d'étude présélectionnés au stade de la consultation

En première analyse, il est proposé pour le chiffrage de la prestation **8** cas d'études au total, soit deux cas de plus que pour PEPS<sub>3</sub>. Ces cas sont détaillés dans le tableau suivant et numérotés 1 à 7 et 9.

Cas présélectionnés lors de la réunion du GT Économie du 10/06/21 :

N° DU CAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Préqualifiés dans les études Peps 3 & 4	NON	NON	NON	NON	eau/cogé	NON	OUI	NON	NON	OUI	NON	NON	NON	NON
Application (P = E, G)	Stockage PTC / HTC	Stockage PTC / HTC	Stockage PTC / HTC	stockage CTC mobile	Stockage HTH	Stockage HTH intersaison	Stockage PTH	Stockage HTH	Stockage HTH	Stockage HTH	Stockage HTH	Stockage HTHmobile	Stockage HTP	Stockage PTH
Matériau de stockage (communiqué à titre indicatif)	eau/MCP	eau/MCP	eau/MCP	eau / CO2 / MCP / N2 liq	eau	eau	eau	eau chaude surchauffée vapeur	huile	Air/solide	sels fondus	Air/solide	Air/solide	Air/solide
Nature du stockage : type d'application (Hypothèse : la source d'énergie primaire peut être de toute nature : gaz, gaz verts, électricité, EnR thermique ou électrique, etc.)	industrie	tertiaire	industrie	tertiaire /industrie	tertiaire résidentiel RCU agro/ CHP	RCU (voir scandinave)	tertiaire /industrie	industrie / solaire th	solaire th	industrie	industrie	tertiaire / RCU	industrie	industrie
Niveaux de températures	<0	<10	<10		<100	90°C	<100	>120	>150	>250	>400	>250	>250	>250
Nombre de cycles	1 à 2 /j	1 à 2 /j	1 à 2 /j		1 à 2 /j	1/an	1 à 2 /j	1/j	1/j	1 à 3/j	1/j	1 à 3/j	1 à 3/j	1 à 2 /j
Durée d'un cycle	h	h	h		h	j	h	h	h	h	h	h	h	h

Des cas complémentaires à ceux listés supra, pouvant être pertinents pour cette étude, peuvent être ajoutés *en option* à la proposition du prestataire.

Dans tous les cas, il sera nécessaire que l'étude PEPS<sub>5</sub> indique la raison pour laquelle tel ou tel cas de stockage thermique abordé dans PEPS<sub>3</sub> n'a pas été retenu et quelle est la pertinence des nouveaux cas étudiés.

#### 2. Cas d'études et Scénarios énergétiques de l'étude :

L'identification et la caractérisation détaillée des différents cas d'études feront l'objet d'une concertation des membres du Club préalablement au lancement de la consultation et d'une réunion de finalisation avec le prestataire de l'étude en début de phase de réalisation. Il en sera de même pour l'établissement du-des différents scénarios énergétiques et des scénarios de prix à retenir pour l'étude. Il pourra être notamment pertinent d'intégrer s'ils sont disponibles l'un des nouveaux scénarios de l'ADEME pour l'évaluation des potentiels de stockages thermique et de P2H ;

À l'issue de cette étape, le choix de cas et des scénarios « contractuels de l'étude » sera arrêté lors de cette réunion « cas et scénarios » du Copil.

## 4. MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

### 4.1. APPROCHE GLOBALE

**La méthodologie de l'étude repose sur l'analyse de la valeur économique et pour la collectivité du stockage pour plusieurs cas d'études** sélectionnés et caractérisés par le Copil avec le prestataire (et le cas échéant à partir de propositions du prestataire).

Dans le cadre de l'élaboration du présent CCTG, le Club Stockage d'énergies de l'ATEE a pré-identifié les éléments suivants pour orienter le travail préliminaire d'identification et d'analyse des cas d'études :

- La présente étude intégrera une mise à jour des cas d'études analysés lors des études PEPS<sub>3</sub> & PEPS<sub>4</sub>, parmi ceux jugés les plus pertinents puis arrêtés par le Copil de l'étude en concertation avec le prestataire ;
- La valeur du stockage dans les ZNI fera partie du périmètre des analyses ;
- Une attention particulière sera portée à une prise en compte du nouveau contexte énergétique, notamment en lien avec le déploiement des réseaux intelligents et des études réalisées dans ce domaine (*dont plus particulièrement celles de RTE et d'Enedis*) ;
- Une valorisation de la contribution du stockage à la résilience des réseaux est attendue.

**Sur le plan méthodologique, l'étude se réalisera en trois étapes :**

- Analyse de la valeur du stockage d'un point de vue sociétal ;
- Analyse de la valeur économique du stockage d'un point de vue d'un porteur d'un projet (*modèles d'affaire types à élaborer sous Excel, inclus dans les livrables détaillés*) ;
- Analyses de sensibilité et identification des facteurs clés des contextes actuel et futur pour la valeur sociétale et la valeur projet, ainsi que pour le déploiement des capacités de stockage (*électricité/P2G et thermique/P2H*).

**Concernant l'élaboration des scénarios macro-énergétiques de l'étude :**

- Pour les cas d'études relatifs à l'usage du stockage dans un système électrique continental, le scénario central de référence sera issu du Bilan Prévisionnel de RTE actualisé en 2021 avec les nouveaux scénarios 2030-2050 ;
- Les scénarios macro-énergétiques pour le contexte des ZNI seront élaborés par le prestataire et validés par le Copil, sur la base des travaux réalisés par EDF SEI<sup>3</sup> et l'ADEME et des scénarios de la PPE pour la période 2019-2023 et 2024-2028 ;
- Un scénario « alternatif » de rupture, beaucoup plus favorable pour la mise en œuvre de solutions de stockage d'électricité, sera construit à partir et en cohérence avec le scénario central de référence de RTE. Il mettra en relief les différentes stratégies de déploiement des solutions de stockage dans le système électrique français. Ce scénario doit refléter la généralisation des différents cas d'études au périmètre national et fera l'objet d'une proposition détaillée et argumentée de la part du prestataire, qui sera arbitrée par les membres du Copil.

---

<sup>3</sup> Il s'agit entre autres des bilans prévisionnels de l'équilibre offre / demande d'électricité dans les systèmes électriques insulaires français, réalisés et publiés par EDF SEI.

Les éléments relatifs à l'élaboration des cas d'étude ainsi que le déroulement des principales étapes de l'analyse sont détaillés dans les paragraphes qui suivent.

## 4.2. ANALYSE DE LA VALEUR DU STOCKAGE D'UN POINT DE VUE SOCIÉTAL

### 4.2.1. Évolution des besoins de flexibilité du système électrique et mix optimal de solutions de flexibilités du point de vue du surplus collectif à l'échelle de la métropole

Cette approche inclut le stockage mis en perspective versus d'autres sources de flexibilité : écrêtement, production flexible, effacement, renforcements réseaux, en compétition sur leurs critères technico-économiques et aussi sur leurs impacts environnementaux (ACV) respectifs, qui prendra en compte le prix du carbone et les Capex des technologies :

- Cette analyse devra être réalisée à la maille France métropolitaine, tout en modélisant explicitement la contribution des pays voisins aux besoins de flexibilité français. Elle s'appuiera sur les scénarios RTE du bilan prévisionnel 2020 (*voire d'un ou plusieurs autres scénarios tels que précisés supra*) ;
- La modélisation inclura une représentation de l'équilibre offre-demande au pas de temps le plus pertinent (*horaire par exemple*), ainsi que la réservation de capacités de production pour l'ajustement et la fourniture de services système (*réglage primaire de fréquence*). Les nouveaux usages (*rechargement de véhicules électriques, power to heat, autoconsommation,...*) seront explicitement représentés ;
- Le prestataire devra évaluer les coûts/bénéfices sur les usages réseaux (*non industriels*) apportés par le stockage d'électricité, dans la perspective notamment du déploiement des réseaux intelligents : Une modélisation du réseau national n'est pas requise. À ce titre, l'actualisation de l'étude de Benchmark réalisée dans le cadre de l'étude PEPS<sub>4</sub> semble pertinente (*cette étude sera communiquée au prestataire à sa demande*) ;
- De plus, il sera souhaitable de pouvoir se concerter sur ces travaux avec RTE, notamment dans le cadre de l'actualisation de leur bilan prévisionnel et des scénarios 2030. Une consultation de RTE est souhaitable pour traiter la valorisation des services potentiels du stockage au réseau de transport.

### 4.2.2. Points importants

Une attention particulière sera portée à l'actualisation des éléments de coûts d'investissements (*Capex*) et d'exploitation (*Opex*) et des performances des filières de stockage d'électricité en cours de déploiement, principalement des batteries de différents types, sans nécessairement se limiter aux batteries Li-ion.

Il est également demandé de réaliser une projection des Capex sur un horizon 2030 (*et 2050 en option*), applicables à tous les scénarios de l'étude.

D'une façon générale, il est rappelé les travaux d'actualisation porteront principalement sur les technologies dont les projections de Capex/Opex ou la pertinence ont fortement évolué depuis l'étude PEPS<sub>4</sub>, qu'elles aient été abordées ou pas dans cette première étude (*notamment batteries, H2, stockage de froid,...*). Les évolutions constatées seront détaillées dans le rapport d'études, avec **l'ensemble des hypothèses de Capex et d'Opex sur les différentes filières technologiques.**

**Par ailleurs, pour les autres technologies, le rapport présentera une actualisation de l'ensemble des fiches produits élaborées dans le cadre des études PEPS<sub>1</sub>, PEPS<sub>3</sub> & PEPS<sub>4</sub>, sur la base de nouveaux éléments disponibles.**

Devront être prises plus particulièrement en compte les filières suivantes :

- Steps :
  - Micro Steps ;
  - Steps marines ;
- Stockage de masse gravitaire en mer :
  - Technologies de stockage en mer de type de celui développé par la start-up MGH, à partir d'un système de poids reliés à des structures flottantes.
- Batteries :
  - Batteries Li-ion ;
  - Batteries Li-air, Zn-air, Na-ion,... ;
  - Batteries chaudes (Na) ou Redox flow.
- Stockage par volants d'inertie ;
- Stockage par air comprimé :
  - CAES ;
  - Micro CAES (< 50 MW) ;
  - CAES marins ;
  - LAES.
- Power to gas :
  - Électrolyse alcaline, PEM ou haute température, méga-électrolyseur ;
  - Usage H<sub>2</sub> direct ou injection directe dans les réseaux, méthanation ;
- Stockage thermique :
  - Tous les stockages retenus dans l'étude PEPS<sub>3</sub> ;
  - Le stockage de froid (glace, autres techniques) ;
  - Les stockages à changement de phase ;
  - Le stockage thermochimique.

Il est demandé de préciser les besoins que peuvent couvrir les moyens de stockage considérés et une cartographie des fonctions qu'ils peuvent réaliser.

Pour mener à bien cette actualisation, les différentes composantes des coûts (Capex, Opex) du stockage - par technologie - telles que proposées dans des études récentes, seront plus particulièrement pris en compte .

Ces références devront être mises en perspective pour la réalisation de l'étude.

**Pour l'actualisation des performances, une consultation méthodique des acteurs des technologies concernées s'imposera et les enquêtes, en cas d'accord des sources concernées, seront incluses dans les livrables détaillés de la prestation.**

#### 4.2.3. Prestations à réaliser

a) *Mettre à jour l'évaluation économique du segment France Métropolitaine retenu dans PEPS<sub>4</sub>. Ce travail se fera au regard de l'évolution des modes de valorisation des actifs ne rentrant pas stricto sensu dans des mécanismes de soutien à la filière stockage d'électricité, à savoir :*

- Le marché de l'énergie ;
- Le mécanisme d'ajustement ;
- Le marché de capacité ;
- Les marchés de fréquence (AFR, AFFR,...)
- Les offres de services système (réserve rapide, contrôle de fréquence) ;
- Le V2G ;
- Les garanties d'origine ;
- Les CEE ;
- ...

**Dans la mesure du possible, pour les évaluations économiques et la place du stockage sur la courbe d'ordre des mérites économique mais aussi environnemental pour chaque cas d'étude, le prestataire doit privilégier une approche qui propose des profils de stockage génériques (en termes de performances, caractéristiques de fréquence, délais et durées de déstockage), technologiquement neutres, dimensionnés en fonction des profils de besoins permettant de couvrir le ou les services considérés.**

L'étude pourra proposer la création de nouveaux services motivés par des besoins croissants de flexibilité du réseau électrique et auxquels un développement des moyens de stockage pourrait répondre.

De plus, il est demandé pour ces évaluations :

- **De prendre en compte explicitement les coûts relatifs à la conversion de courant** (onduleur, électronique de puissance) et au contrôle/commande des unités de stockage, hors coûts fonciers. Il est également demandé de présenter une segmentation des différents coûts respectifs entre cellules élémentaires, empilements et systèmes de conversion notamment.
- **De prendre en considération :**
  - L'impact d'un développement massif de la mobilité électrique, à plus long terme de l'hydrogène, du biométhane ou des gaz de synthèse (P2G) ;
  - Le V2G (Véhicule to grid) ;
  - L'autoconsommation (avec stockages diffus et distribués) ;
  - La réserve rapide de fréquence.
- **De modéliser**, avec la granularité temporelle pertinente, l'impact des sources de production et de consommation diverses sur les besoins en flexibilité du système électrique. Il peut s'agir entre autres du stockage de chaleur (P2H notamment), des VE ou VEH et de l'autoconsommation.

b) Prendre en compte, à l'horizon 2030 (avec une option d'un horizon 2050)

c) Compléter l'étude PEPS<sub>4</sub> pour une ZNI type

Le prestataire développera un voire deux cas d'étude (1 centralisé et un distribué) permettant d'analyser finement les besoins de ces zones non interconnectées sur un profil de mix type à caler avec les membres du Copil.

Il s'agit notamment d'étudier l'intérêt du stockage pour l'équilibrage global de la zone non interconnectée, avec un taux de pénétration très élevé des EnR intermittentes dans le mix de production.

Le profil de référence de la ZNI considérée sera proposé par le prestataire pour validation avec les représentants du Copil de l'étude lors de la première réunion de projet.

Une concertation d'EDF SEI sera recherchée dans le cadre de la réalisation de cette tâche.

d) Renforcer les approches sociétales et macro-économiques développées dans PEPS<sub>4</sub>, en prenant en compte les enseignements tirés des études qui ont été publiées (à identifier)

e) Analyser, à la maille France Métropolitaine et ZNI et pour les usages concernés, les impacts sur le stockage d'électricité :

- **De la réglementation actuelle:** Profils des tarifs d'acheminement, règles de raccordement, règles d'autoconsommation, dispositions réglementaires des gestionnaires de réseaux dans la conduite et l'exploitation des systèmes de stockage, rôle de la CRE, appels d'offres de solutions de stockage couplés à des EnR lancés par les gestionnaires de réseaux de distribution et de transport, objectifs de la PPE, etc.), en identifiant les leviers mais également les freins actuels ;

- **Des nouveaux usages** (dont la mobilité, le V2G, l'autoconsommation) ainsi que les nouveaux services pouvant être apportés : réserve rapide, régulation de fréquence...

Dans une approche qualitative, il est demandé au prestataire de montrer la façon dont les différents cas d'études analysés dans PEPS<sub>1/3/4</sub> ont évolué depuis la période de PPE 2015-2018 et comment la valeur pouvant être générée par le stockage se répartit entre les différents acteurs ;

- **De l'évolution de la résilience du réseau électrique et des usages** pouvant influencer le déploiement du stockage. Pour le cas d'étude considéré, le stockage doit garantir la continuité d'alimentation des installations connectées au réseau lorsque ce dernier affiche un taux de défaillances très élevé ;

- **Du plan climat publié par la Commission européenne fin 2016**, qui pourrait présenter un impact notable en termes de réglementation et de développement de nouveaux services sur le stockage ;

- **De la nouvelle réglementation batteries** actualisant la Directive batteries ;

D'autres sources d'impact pourront être proposées le cas échéant par le prestataire.

f) Analyser les impacts sur les perspectives de la filière stockage des mécanismes de soutien existants aux filières EnR et à l'efficacité énergétique :

Il s'agit, entre autres, des mécanismes de soutien aux énergies renouvelables, à l'efficacité énergétique, à la rénovation énergétique des bâtiments, à la réduction des émissions polluantes et des GES, au schéma de déploiement des EnR en territoires, etc.

Les solutions telles que des compléments de rémunération, des crédits d'impôts, des primes à l'acquisition, la valorisation des garanties d'origine, les CEE, des contrats long terme, etc. en font partie, pour tout type de stockage (électricité, chaleur/froid).

g) Analyser, à la maille France Métropolitaine et ZNI, les impacts sur le stockage thermique de l'évolution de la réglementation et des objectifs PPE en matière d'intégration des EnR&R dans les réseaux de chaleur et de froid.

h) À partir des analyses précédentes, identifier les hypothèses ayant a priori un impact significatif sur la valeur du stockage (électricité/P2G et thermique/P2H), comme par exemple :

- Les cibles de taux de pénétration des ENR, dont le scénario avec EnR renforcées et horizon 2030 (2050 dans le cadre de l'option) constitue une limite haute ;
- La politique de prix du CO<sub>2</sub> ; la taxe carbone ;
- L'arbitrage avec d'autres actifs de flexibilité dont effacement & production de pointe,
- La prise en compte – ou l'internalisation - des autres impacts environnementaux ;
- Les coûts et gisements des solutions de flexibilité concurrentes : pilotage de la demande, interconnexions électriques avec les pays riverains... ;
- Les prix des énergies substituées ;
- Les niveaux de CAPEX ;
- Les durées de stockage/déstockage et les performances de l'unité de stockage ;
- L'évolution du contexte européen en particulier sur le stockage d'énergies (notamment mobilité électrique).

**Ces éléments seront ensuite discutés avec les membres du Copil de l'étude de façon à sélectionner 4 à 5 paramètres pour le segment France métropolitaine et 2 à 3 paramètres pour le segment ZNI, sur lesquels le prestataire réalisera des analyses de sensibilité.**

Les fourchettes de valeurs des paramètres seront également validées en concertation avec le Copil.

i) Identifier et analyser les leviers réglementaires / institutionnels pouvant affecter la valeur projet du stockage pour les porteurs de projet dont :

- Le paramétrage des offres de capacité (prix et volumes) ;
- Les couts d'accès aux réseaux (électricité & gaz), en fonction des profils de consommation ;
- La transposition des différentes Directives européennes en respect des règles communautaires de 2014 relatives aux aides d'État aux énergies renouvelables ;

- La transposition des codes de réseaux européens, en France et chez nos proches voisins, pouvant impacter les conditions de raccordement aux RPD/RPT des actifs de stockage d'électricité. Une consultation des gestionnaires de réseaux sera nécessaire sur ce sujet ;
- Les leviers et freins d'ordre réglementaire qui peuvent être identifiés, de toutes natures (les mécanismes ou dispositions efficaces pour la mise en œuvre des solutions de stockage sont à identifier) ;
- Le paquet climat-énergie publié par la Commission européenne, qui peut influencer le développement de nouveaux services voire la réglementation sur le stockage ;
- ...

Le choix final des leviers réglementaires / institutionnels à prendre en compte dans l'étude fera également l'objet d'un arbitrage par les membres du Copil. Le prestataire est invité à proposer dans son offre les leviers qui lui semblent les plus pertinents.

Dans le cadre de l'analyse de ces différents facteurs, l'objectif est double : Dresser un état des lieux des régulations existantes et fournir des recommandations pour les régulations futures, qui pourront apporter un éclairage sur la PPE qui couvrira la période 2023-2028.

## 5. RÉCAPITULATIF DE L'ENSEMBLE DES LIVRABLES ATTENDUS POUR L'ÉTUDE

1. Rapport final public (avec résumés en Français et en anglais), d'un volume cohérent avec les deux études cumulées précédentes (PEPS<sub>3</sub> + PEPS<sub>4</sub>), incluant en annexe les fiches technologiques et les hypothèses détaillées de l'étude (dont évolutions des OPEX/CAPEX);  
Ce rapport sera découpé en deux volets autoporteurs pour le stockage d'électricité/P2G et pour le stockage thermique/P2H ;
2. Rapport détaillé réservé aux seuls membres du Copil) (dito pour le volume), incluant les livrables complémentaires suivants :
  - a. Fiches technologiques présentant les éléments de CAPEX et OPEX actualisés ;
  - b. Figures et schémas non présentés dans le rapport final (graphiques, courbes et tableaux) ;
  - c. Tableaux Excel de calculs des modèles d'affaire ;
  - d. Enquêtes sectorielles ;
  - e. Liste d'études de référence utilisée pour l'étude ;
  - f. Référentiel technique et normatif.

## 6. PRESTATIONS OPTIONNELLES (À CHIFFRER EN COMPLÉMENT ET SÉPARÉMENT)

### 6.1. ACTUALISATION D'UN BENCHMARK DES PRINCIPAUX PAYS QUI DÉVELOPPENT LE STOCKAGE SUR LES CAS D'ÉTUDES TRAITÉS

Ce benchmark sera en fait une actualisation du benchmark sur les acteurs et les marchés réalisé dans le cadre de l'étude PEPS<sub>4</sub>, complété pour les cas d'études considérés par le benchmark à réaliser sur les filières de stockage thermique et le P2H.

Dans le cadre de ce benchmark, une synthèse des différents marchés du stockage à l'international, en les mettant en perspective avec le marché français, est demandée.

Ce travail reposera entre autres sur les différents enseignements (prix/volumes/technologies) tirés des appels d'offres de réserve rapide (« demand/response », « frequency control », etc.) lancés dans d'autres pays d'Europe (UK), aux USA, etc.

Les zones géographiques à instruire dans le cadre de cette analyse de marché sont les suivantes :

- Asie : Japon, Corée, Chine ;
- États-Unis ;
- Europe : Allemagne, UK, Danemark.

## 6.2. ANALYSE DES SOLUTIONS DE FLEXIBILITÉ EN COURANT CONTINU ET PLACE DU STOCKAGE DANS CES SOLUTIONS

Analyse des impacts possibles d'une alimentation en DC de certains appareils normalisés (TIC cf. séries de normes ITU-T L.1000, éclairage LED 12 V) à l'instar des prises normalisées DC pour les VE<sup>4</sup>.

Une tâche de construction des scénarios / hypothèses pour cette analyse reste un élément déterminant pour garantir sa pertinence. Ces hypothèses seront bâties par les membres du Copil de l'étude.

## 6.3. ANALYSE DE LA SECONDE VIE DES BATTERIES

Dans le cadre d'une actualisation de l'analyse de sensibilité sur coût et gisement des études PEPS<sub>3</sub> et PEPS<sub>4</sub>, une expertise pourra être menée auprès d'organismes compétents (*par exemple sur l'analyse du vieillissement des cellules en fonction des différents aléas*), auprès des acteurs français de la R&D sur les batteries.

Il ne s'agit nullement de réaliser une évaluation fine de l'impact des secondes vies de batteries, mais d'étudier leur influence globale sur le scénario de déploiement de la filière stockage.

L'étude de cet usage ne pourra donc être traitée que sur un plan strictement qualitatif.

## 6.4. PRISE EN COMPTE DE L'IMPACT DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DANS LES MODES DE VALORISATION

Mesurer l'impact sur la consommation des ressources primaires de la partie infrastructures de stockage de chaque scénario (*minimisation*) et leur aspect environnemental en fournissant les ACV unitaires et élémentaires par type de technologie étudié.

## 7. PÉRIMÈTRES ET SCÉNARIOS DE MODÉLISATION

Une bonne maîtrise de la modélisation du mix de production en France Métropolitaine et en ZNI est indispensable pour garantir lisibilité, opposabilité, cohérence et pertinence des résultats de l'étude.

Pour le modèle proposé, il est demandé de prendre en considération :

### 7.1. POUR LE PARC DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE

- Une maille France incluant les imports/exports (scénario PEPS<sub>3</sub>) ;
- Une modélisation explicite des contraintes de fonctionnement des actifs de production, supposant également la modélisation explicite des voisins Européens ;

---

<sup>4</sup> La plage de tension DC pour forte puissance est également normalisée au niveau mondial 260-400VDC (cf. EN 300 132-3-1 et série L.1200, et en DC UPS CEI/CENELEC), spécification « Emerge Alliance ».

- Plusieurs scénarios d'évolution du mix énergétique proposés par RTE dans leur dernière mise à jour ;
- Une construction des segments représentatifs suivant les différents profils retenus pour l'étude (à valider avec le Copil de l'étude lors de la première ou seconde réunion de projet).

Pour rappel, il doit être prévu :

- Une modélisation explicite du parc de production d'électricité ;
- La prise en compte de l'équilibre offre-demande avec la granularité temporelle la plus pertinente ;
- La prise en compte de la réserve rapide de fréquence.

## 7.2. POUR LES ENQUÊTES SECTORIELLES

L'étude peut prévoir la réalisation d'enquêtes sectorielles (*interviews d'acteurs de la filière notamment*) sur les différents segments proposés et intégrer les études déjà réalisées, qui compléteront les informations pouvant être fournies par l'ATEE et les membres du Copil.

À partir des éléments qualitatifs et quantitatifs mis en exergue par l'étude, il s'agira également de bâtir un déroulement chronologique du développement plausible du parc d'installations, en intégrant :

- Les différentes segmentations proposées ;
- L'évolution actualisée la plus probable de la filière stockage pour la France métropolitaine et les ZNI, intégrant le développement de nouveaux projets et l'arrivée de nouvelles technologies ;
- Les scénarios « alternatifs » de l'évolution de la filière, en tenant compte des ruptures potentielles technologiques et/ou régulateurs.