



**CHAIRE EUROPEAN
ELECTRICITY MARKETS**
Fondation Paris-Dauphine



Le(s) stockage(s) comme leviers de flexibilité. Quelle valeur économique pour investir ?

Dominique FINON

Directeur de recherche CNRS émérite

Colloque Hydro 21 « Stockage et flexibilité: place de l'hydraulique? »

Grenoble , 7 décembre 2018

Introduction

La complexité de l'économie de systèmes électriques accrue par le développement des ENRi d'un ordre de grandeur

L'intérêt économique et technique d'un nouvel équipement de stockage dépend moins de son coût que de la valeur des différents services qu'il rend au système:

- Valeur des différents services rendus $>$ coûts fixes (investissement, O&M)
- Raisonner par rapport au système parce que tous les éléments sont en interactions physiques et économiques étroites dans le temps et l'espace

Distinguer le problème de valorisation selon les types de systèmes (grand vs petit, réseaux denses vs peu denses, systèmes intégrés vs système isolé, part d'ENRi)

Sommaire

1. Nouveaux besoins de flexibilité et nécessité de stockages
2. De la valeur économique des stockages
3. De la valeur pour le système à la valeur pour un opérateur-investisseur

1. Nouveaux besoins de flexibilité et nécessité des stockages

1.1. Avant les ENRi, des réponses conventionnelles

Avant les ENRi

Service-flexibilité orienté sur **le suivi de la demande horaire** et la gestion des aléas sur **disponibilité grands équipements** et **demandes en pointe d'hiver**

- Règlages de tension et de fréquence facilement assurés par éq. production
- Redispatching pour congestion
- Équilibrage journalier facilement assuré par dispatching des différents types d'unités pilotables (dont TAC/TAG ou hydro pendant les jours d'hiver)
- « Arbitrage »
 - STEP pour meilleure efficacité de la gestion hebdomadaire (en plus de journalière)
 - Rôle des réserves de lacs dans gestion inter-mensuelle et inter-saisonnière

1.2. Après développement des ENRi à grande échelle...

- Nombreux besoins de réglages de tension et de fréquence (services-système)
 - Cycles de rampes rapides à la hausse et à la baisse dues au PV et aux éoliennes (un peu moins)

- Réseaux T&D: nombreux redispatchings à réaliser autour de nouvelles congestions

- Equilibrage horaire, journalier et hebdomadaire sur l'énergie selon les apports météorologiques .

- Equilibrage intersaisonnier dans des systèmes à 80-100% de part d'ENR,
 - Utilisation des surplus de production pour combler les déficits d'offre sur d'autres heures ?
 - Y a-t'il un enjeu avec 40-50% d'ENR (30-40% d'ENRi) ?

1.3. Les stockages comme réponse aux besoins de flexibilité (I)

Paramètres -clé

Ratio énergie/puissance

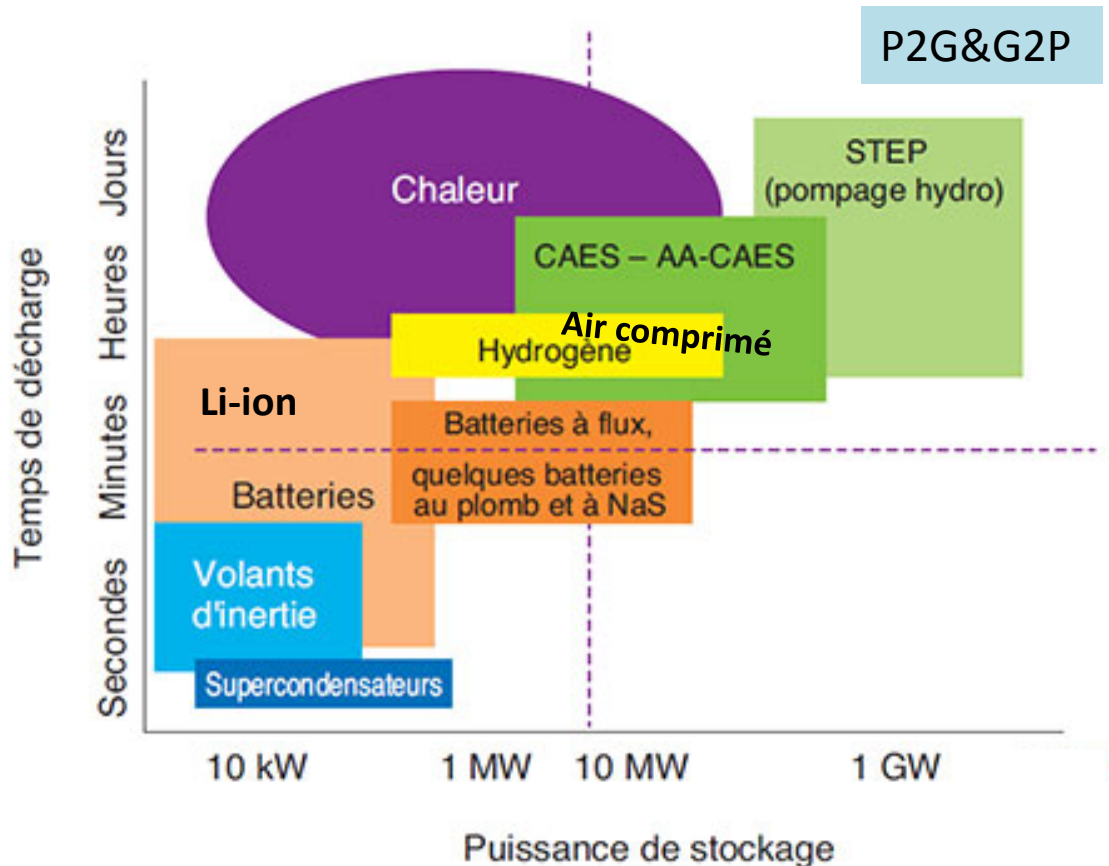
Vitesse de décharge

Taille

- niveau système / GRT
- niveau GRD
- niveau individuel

Temps de réaction (pour la fourniture services-système)

Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)



Source : IFPEN d'après diverses sources

Les stockages comme réponse aux besoins de flexibilité (II)

Technologies	Taille kW/MW	Temps de décharge	Localisation dans le système	Services rendus			
				Qualité du produit . Règlage fréquence	Résolution contraintes de réseaux (court terme)	Gestion équilibrage énergie (Arbitrage)	Contrib. capacité de pointe/ Renforceme nt réseaux
Batteries Li-ion	1kW -1MW	Minutes/ heures	Individuel & Réseaux distribution	+	+		
Batteries de type flux redox	100kW- 15MW	Heures.	Réseaux de distribution et transport	+	+		
Stockages diabatique & adiabatique à air comprimé	10 MW- 200 MW	Heures	Réseau de transport				
Station de pompage	200MW- 1000MW	STEP jour (24h) STEP hebdo	Réseau de transport	+			

2. La valeur économique des stockages

- Comprendre le côté “valeur” d’un équipement de stockage
 - Complexité du repérage car multitude de paramètres en interaction spatiale et intertemporelle
 - Plusieurs services , et pas un seul service ou produit
 - Décomposition en
 - Valeur d’équilibrage
 - Valeur d’arbitrage
 - Valeur de réseau
 - Valeur capacitaire
 - Services spatialisés (par exemple pour le GRD ou le GRT)
- Autre difficulté
 - la valeur pour le système ne correspond pas à la valeur qu’il pourra dégager sur les différents marchés ou mécanismes de marché

Valeur pour le système \neq Valeur monétarisable par l’opérateur

2.1. Des fonctions du stockage à sa valeur économique

Fonctionnalité	Période d'intervention	Moyens de flexibilité Stockages versus Concurrents
<p>1. Gérer et optimiser la fourniture des réserves tertiaires et secondaires</p> <p>2. Corriger les congestions</p>	Interventions entre 1s et 1h	<p><i>Volant d'inertie</i> <i>Batteries</i></p> <p><i>Moyens conventionnels (TAG, TAG)</i> <i>Onduleurs avancés</i> <i>Ecrêtements des prod. ENRi</i></p>
<p>Gérer les charges</p> <p>Corr. des erreurs de prévision des ENRi</p>	Journalier et infrajournalier (minutes-heures)	<p><i>Batteries</i> <i>Air comprimé</i> <i>Petites STEP</i></p> <p><i>Usages asservissables (ECS, recharge des VEL)</i> <i>Effacements par les agrégateurs</i> <i>Ecrêtement des productions ENRi</i></p>
Gérer l'équilibre prod –conso sur la semaine	Hebdomadaire pour gérer l'équilibre production/conso	<p><i>STEP</i></p> <p><i>Hydraulique de réserve</i></p>
Gérer la saisonnalité de la demande	Saisonnier	<p><i>Power to Gas (et Gas to Power)</i></p> <p><i>Programmation entretien des moyens conventionnels</i> <i>Hydraulique de réserve</i></p>

Fonctionnalité	Période d'intervention	Moyens de flexibilité
<p>Optimiser fourniture des réserves tertiaires et secondaires</p>	<p>Intervention entre 1s et 1h</p>	<p><i>Volant d'inertie</i> <i>Batteries</i></p>
<p>Gérer les charges</p> <p>Correction des erreurs de prévision des prod ENRi</p>	<p>VALEUR d'EQUILIBRAGE</p> <p>Journalier et infrajournalier (minutes-heures)</p>	<p><i>Batteries Li_ion</i> <i>Batteries Flux</i> <i>Air comprimé</i> <i>Petites STEP</i></p>
<p>Gérer l'équilibre prod – conso sur la semaine</p>	<p>Hebdomadaire pour gérer l'équilibre production/conso</p>	<p><i>STEP</i></p> <p><i>Hydraulique de réserve</i></p>
<p>Gérer la saisonnalité de la demande</p>	<p>VALEUR d'ARBITRAGE</p> <p>Saisonnier</p>	<p><i>Power to Gas (et Gas to Power)</i></p> <p><i>Hydraulique de réserve</i></p>

2.2. Explicitation de la valeur d'arbitrage d'un stockage par STEP

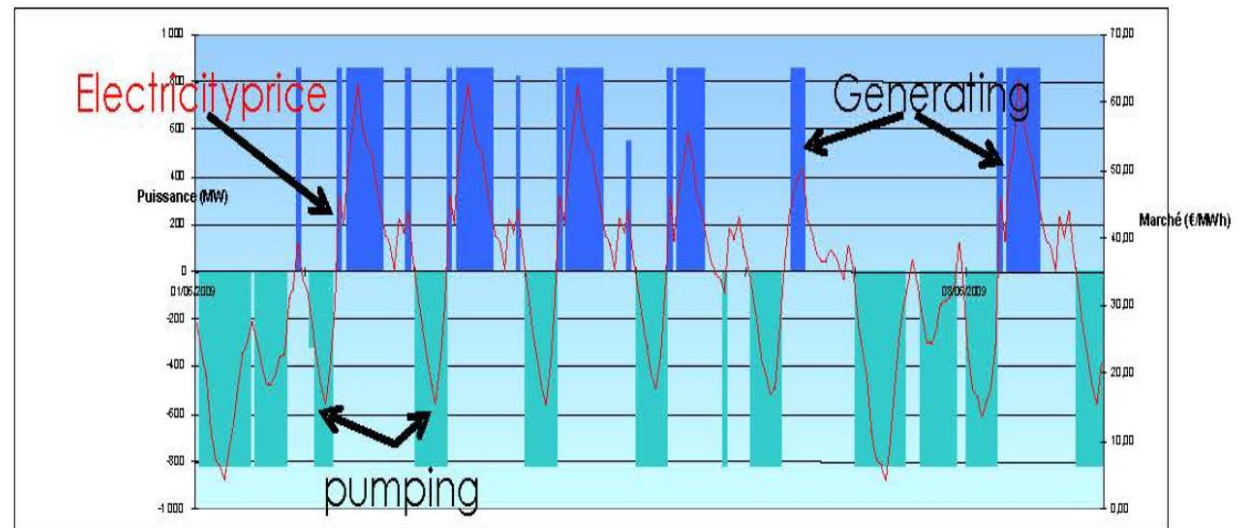
- **Soutirer** l'élec pendant les **périodes prix faibles (forte prod ENR)** et la valoriser lors de **périodes de prix élevés (faible production ENR)**

- **Pour une STEP**

Il faut que **le gain** (prix revente-prix d'achat) compense **au moins** la **perte due au rendement (25%)** selon le prix du soutirage payé au GRT

Pour un équipement à créer, prendre **aussi** en compte son amortissement en €/MW quand on décide de le créer en tablant sur les revenus de l'arbitrage

Noter recettes importantes par services système

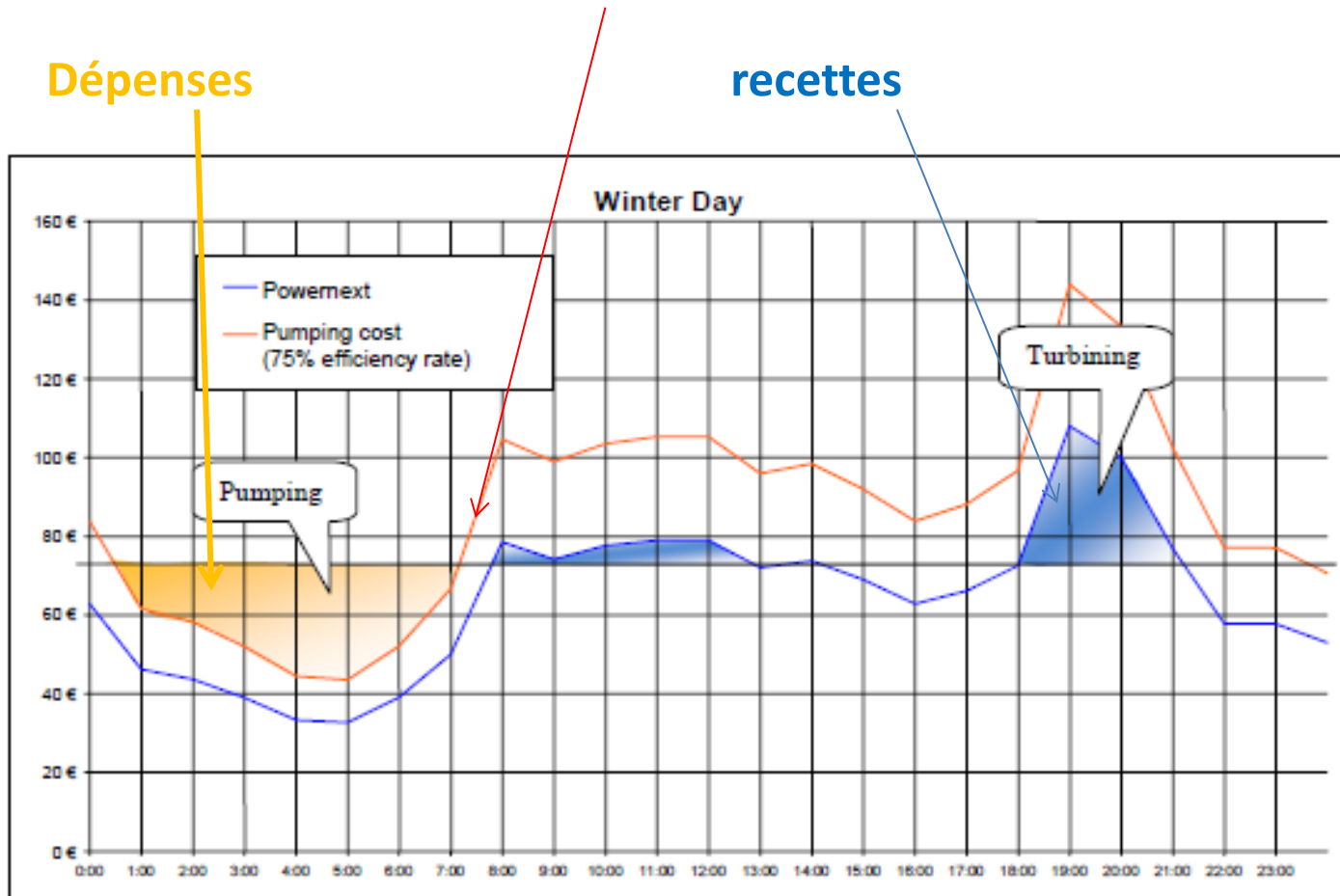


STEP : Arbitrage sur une journée

L'écart de prix attendu en périodes creuses et pleines doit être suffisant pour au moins compenser le rendement du cycle

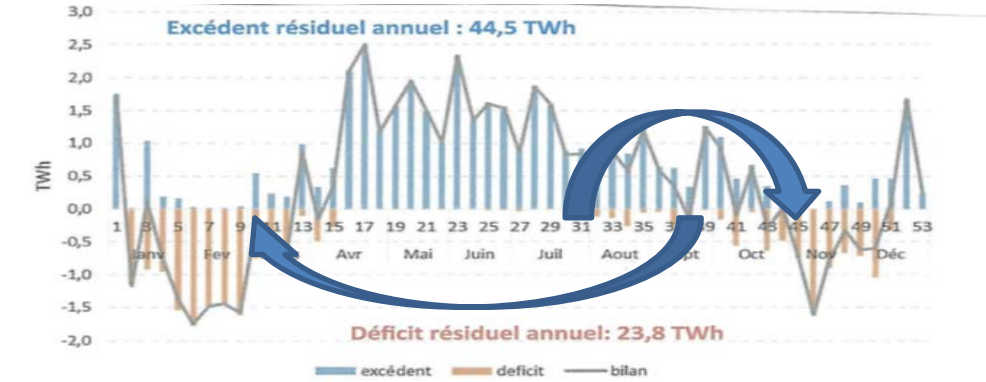
Contraintes de durée min en turbine $\frac{1}{2}$ h et en pompage: **1h**.

Le coût du pompage selon le prix du marché



2.3. Quid de la valeur d'arbitrage intersaisonnier du P2G & G2P , (I)

Solution d'équilibrage dans le modèle énergétique à 80-100% ENR



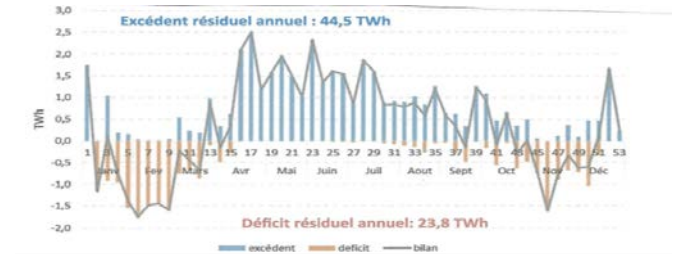
Chaîne électrolyseur+ méthanation+ CCGT (avec émissions CO2 ou captage CSC)

1° défi : Rendement de la chaîne : 20-30%

« Battre » le coût d'achat de l'élec en heures de surplus d'ENR pour une production quatre à cinq fois moindre

2° défi: rentabiliser l'investissement en recouvrant les coûts fixes d'inv. et O&M par les revenus de l'arbitrage

2.3. Quid de la valeur d'arbitrage intersaisonnier du P2G & G2P (II)



2° défi: Rentabiliser l'investissement en recouvrant les coûts fixes d'inv. et O&M

Coût estimé de la chaîne hors achat élec. 170 €/MWh en 2050

mais avec, pour le calcul de l'amortissement, hypothèse de **fonctionnement régulier de l'électrolyseur à capacité nominale** sur 4000h (demande en quasi- ruban)

Contradiction avec production ENRi fluctuante avec excédents concentrés sur période courtes

CCL: Recyclage des surplus des productions d'ENRi sur base inter-mensuelle: très difficilement économique.

Source: Etude ADEME GRTgaz GRDF portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire

2.4. Autres valeurs d'un stockage pour le système

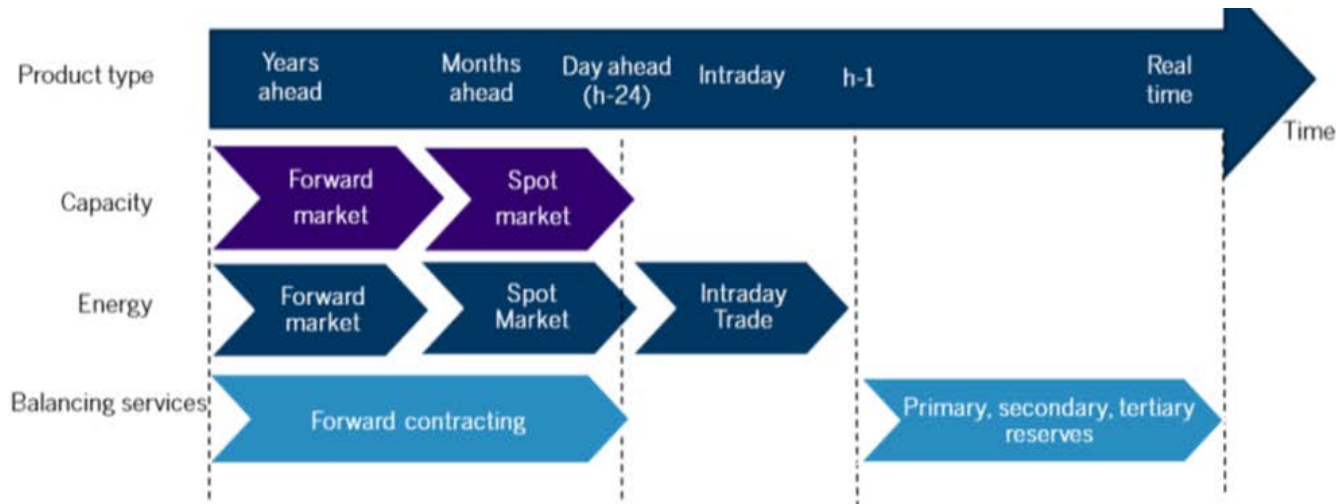
Valeur d'équilibrage	Fourniture de réserves opératoires au GRT pour réglage (Fréquence, tension) Résolutions des congestions Gestion des pointes locales (GRD)
Valeur d'arbitrage	Equilibrer l'offre et la demande à l'échelle du système électrique en valorisant lors de périodes de plus faible prod. ENRi, la production stockée lors de périodes de forte prod.
<i>Long terme</i>	

2.4. Autres valeurs d'un stockage pour le système

Valeur d'équilibrage	Fourniture de réserves opératoires au GRT pour réglage (Fréquence, tension) Résolutions des congestions Gestion des pointes locales (GRD)
Valeur d'arbitrage	Equilibrer l'offre et la demande à l'échelle du système électrique en valorisant lors de périodes de plus faible prod. ENRi , la production stockée lors de périodes de forte prod.
Long terme	
Valeur réseaux	<i>Réduction/report des investissements réseaux</i>
Valeur capacitaire (adéquation de capa)	<i>Réduction des investissements en capacité de prod. (équipement de pointe, équipements flexibles)</i> <i>Meilleure intégration éco. des ENRi dans le système</i>

3. De la valeur pour le système à la valeur pour un opérateur-investisseur

Une majeure partie de ces valeurs doit revenir aux opérateurs/investisseurs en stockage par leurs revenus à attendre sur les marchés



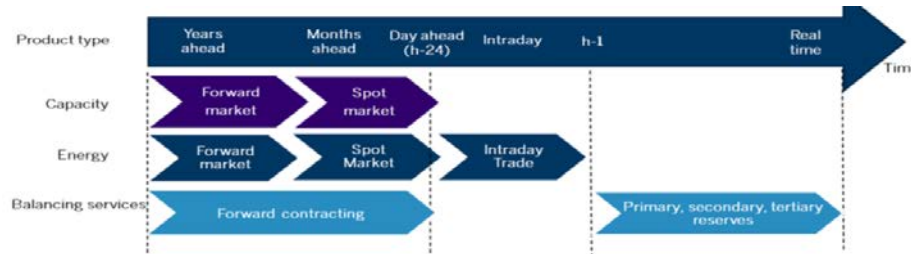
1. Valeur d'arbitrage la plus évidente à trouver sur le **marché (day ahead et intra-day)**

Plus difficile sur les « **marchés de la flexibilité** » actuels (balancing et services système)

- **imparfaits**
- **à améliorer**

3. De la valeur pour le système à la valeur pour un opérateur-investisseur

Une majeure partie de ces valeurs doit revenir aux opérateurs/investisseurs en stockage par leurs revenus à attendre sur les marchés



1. Valeur d'arbitrage la plus évidente à trouver sur le **marché (day ahead et intra-day)**

Plus difficile sur les « **marchés de la flexibilité** » actuels (balancing et services système)

2. Plus difficile pour les valeurs de "long terme"

- **Marchés de capacité** intègrent stockage et effacement,
 - mais revenus fluctuants et aléatoires
- Quid de **la valeur pour les réseaux** ?
 - **En Europe** les GRT (et GRDs) interdits de stockage
 - Les seuls à savoir où **dégager** (mais contraire aux règles européennes) ?

3.1. Progrès dans les règles de marché (I)

Handicap : L'éclatement de la valeur du stockage et la difficulté de révéler chaque partie sur différents marchés

Améliorer au moins chaque marché

Valoriser les flexibilités du temps réel sur les **marchés de services système** :

- Instaurer mécanismes de marché pour différents types de services-système (durée d'engagement courtes)
- Lever les seuils sur capacité unitaire pour participation à ces marchés
- Adapter les codes de réseau

Améliorer les **marchés infra journaliers et d'ajustement** pour valeur d'arbitrage infra-journalière

- taille des produits

3.1. Progrès dans les règles de marché (II)

Marché de capacité pour valeur capacitaire

- Intégration des stockages dans le mécanisme de capacité
- Règles techniques adaptées au stockage (possibilité d'agrégation, seuil)

Valeur réseau

Sans changement règle européenne

- Incitation des GRT/D à la contractualisation pour limiter investissements réseaux (à travers la régulation incitatrice des tarifs réseaux)
- Meilleure tarification soutirage/injection pour refléter cout-bénéfice pour le système

Ou Changement de règles européennes

- Accepter que GRT ou GRD puissent développer des stockages

3.2. Mais est ce suffisant pour investir?

Revenus fragmentés et aléatoires (forte volatilité du prix dépendant des situations du système)

DE PLUS Effets dynamiques très difficiles à anticiper

- si investissements en stockage non coordonnés, baisse de la valeur d'arbitrage des anciennes unités de stockage (faillite)
- Effet de développement d'ENRi sur baisse de l'écart prix jour-prix nuit
 - Baisse revenus anticipables de 5 STEP en projet en Suisse (abandon)
- Concurrence des stockages et plusieurs options de flexibilité

Donc pas de vraies garanties de revenus de long terme

3.2. Mais est ce suffisant pour investir?

Concurrence entre stockages et autres options de flexibilité

Fonctionnalité	Moyens de flexibilité en concurrence
Interventions entre 1s et 1h 1. Gérer et optimiser la fourniture des réserves tertiaires et secondaires 2. Corriger les congestions	Volant d'inertie Batteries <i>Moyens conventionnels (TAG, TAG)</i> <i>Onduleurs avancés</i> <i>Ecrêtements des prod. ENRi</i>
Journalier et infra-journalier 1. Gérer les charges	Batteries Petites STEP <i>Usages asservissables (ECS, recharge des VEL)</i> <i>Effacements par les agrégateurs</i> <i>Ecrêtement des productions ENRi</i>
Hebdomadaire Gérer l'équilibre prod - conso sur la semaine	STEP CAES <i>Hydraulique de réserve/Suréquipement</i>
Intersaisonnier Gérer la saisonnalité de la demande	Power to Gas (et Gas to Power) <i>Programmation entretien des moyens conventionnels</i> <i>Hydraulique de réserve</i>

Donc pas de vraies garanties de revenus de long terme

Exemple: quid d'investir en STEP en France?

Une solution (mais difficile à concevoir sans une planification stricte du système)

Appel d'offres pour contrat long garantissant revenus annuels par MW ou MWh

- Sur revenus d'un groupage de services de flexibilité
- Faut-il le dédier aux seuls stockages?

Planification pour définir les besoins de différents services de flexibilité et d'équipement

- En relation avec développement des ENRi
- Basée sur modélisation complexe
- Inventaire précis des sources de flexibilité à l'échelle du système

Voir IEA, 2018, Status of power system transformation.

En guise de conclusion

Se méfier arguments sur les seuls coûts (ex. Batteries Li-ion)

Limites de l'argument sur la compétitivité des couples ENRi-stockage versus technologies bas carbone pilotables (Nuke...)

Raisonner en termes de valeur dans une vision « système » et intertemporelle

L'installation de stockages sur la seule base des signaux de marché (reflétant la valeur des services rendus) n'est pas donnée

- *Incertitudes liées à complexité des interactions à anticiper*
- *Ne pas oublier les autres moyens de flexibilité concurrents*

Besoin d'une planification