

Flexibilité de la demande et équilibre du système électrique

Quels sont les leviers les plus pertinents

Projet CREDEN

Master OSE année 2024-2025

Oscar LAVIOLETTE, <Student 2>, <Student 3>

Janvier 2025



Centre de Recherche en Économie et Droit de l'Énergie



OPTIMISATION DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

Agenda

- 1 Introduction sur la flexibilité de la demande
- 2 *Bénéfices associés à la flexibilité de la demande*
- 3 *Gisements spécifiques par secteur de la flexibilité de la demande*
- 4 *Alternatives de la flexibilité de la demande*
- 5 *Mécanismes de valorisation de la flexibilité*
- 6 *Acteurs de valorisation de la flexibilité*
- 7 *Conclusion : entre défis et opportunités*

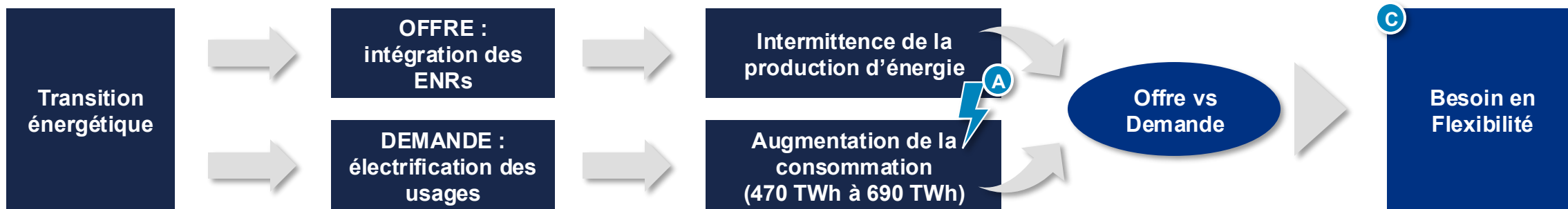


1

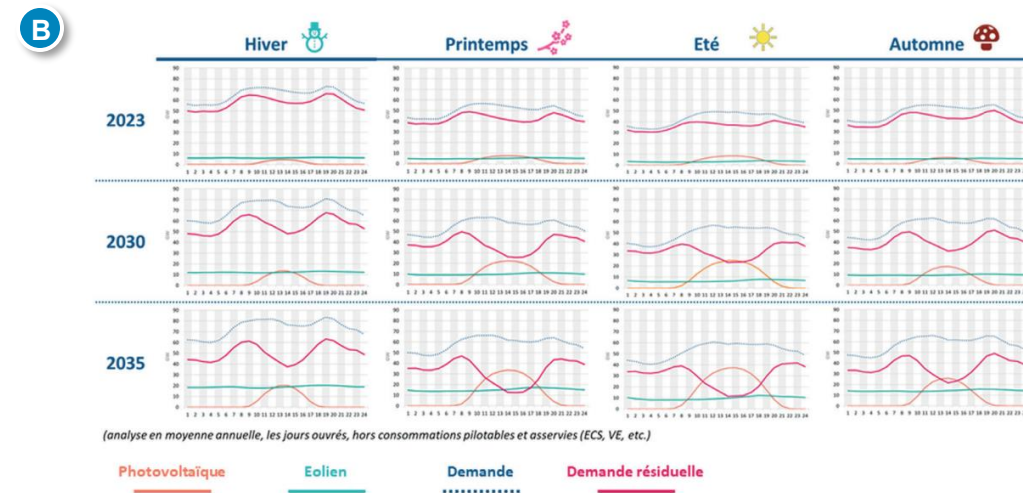
Introduction sur la flexibilité de la demande électrique



Transition énergétique et flexibilité de la demande : un enjeu clé pour l'équilibre du réseau électrique



- A** Décalage temporel entre production et consommation
- Les ENRs (solaire, éolien) ont une production non pilotable et variable dans le temps – **incertitude coté offre**
 - La consommation dans les pays suit des cycles différents (pics matin/ soir, forte demande en hiver) – **demande relativement prévisible**
- B** La demande résiduelle nécessite des moyens de production pilotables
- Impact sur la formation des prix et risque de déséquilibre
- Périodes de forte production ENR et faible consommation → **prix bas, voire négatifs**
 - Périodes de faible production ENR et forte consommation → **forte hausse des prix**
- C** Solution : la flexibilité de la demande afin de pallier les décalages offre / demande



Zoom sur la flexibilité de la demande : des leviers clés pour l'équilibre du système électrique

| | <div> <div>Besoin en volume</div> <div>+</div> <div>-</div> </div> | | |
|------------------|---|--|--|
| | 1 | 2 | 3 |
| | Flexibilités structurelles et régulières | Flexibilités dynamiques | Flexibilités d'équilibrage |
| Description | Vise à aligner la demande avec la production renouvelable pour réduire les coûts et l'empreinte carbone | Ajustements à court terme pour répondre à la variabilité infra-journalière de la consommation et de la production | Ajustements ultra-rapides (secondes à heures) pour stabiliser la fréquence du réseau électrique |
| Objectif | Minimiser la consommation résiduelle aux périodes de forte production ENR | Assurer l'équilibre en fonction des conditions météo et des pics de consommation imprévus | Corriger les déséquilibres imprévus entre production et consommation |
| Horizon temporel | Année, Mois | Jours, Heures | Temps réel (Minutes, Secondes) |
| Type de marché | Marché à terme | Marché SPOT Marché intra-journalier | Mécanisme d'ajustement Services système fréquence |
| Exemple | Structuration des habitudes de consommation selon les pics de production ENR Adaptation aux profils saisonniers et inter-hebdomadaires | Ajustement de la consommation industrielle (arrêts programmés) Adaptation aux conditions climatiques imprévues (vague de froid, baisse de vent) | Activation des réserves primaires, secondaires et tertiaires Réduction ou augmentation immédiate de la consommation/production en réponse aux variations de fréquence |



2

Bénéfices pour le système et
la collectivité

Les bénéfices des flexibilités de la demande



Analyse au regard de la politique énergétique Française

Article L100-1 du code de l'énergie:

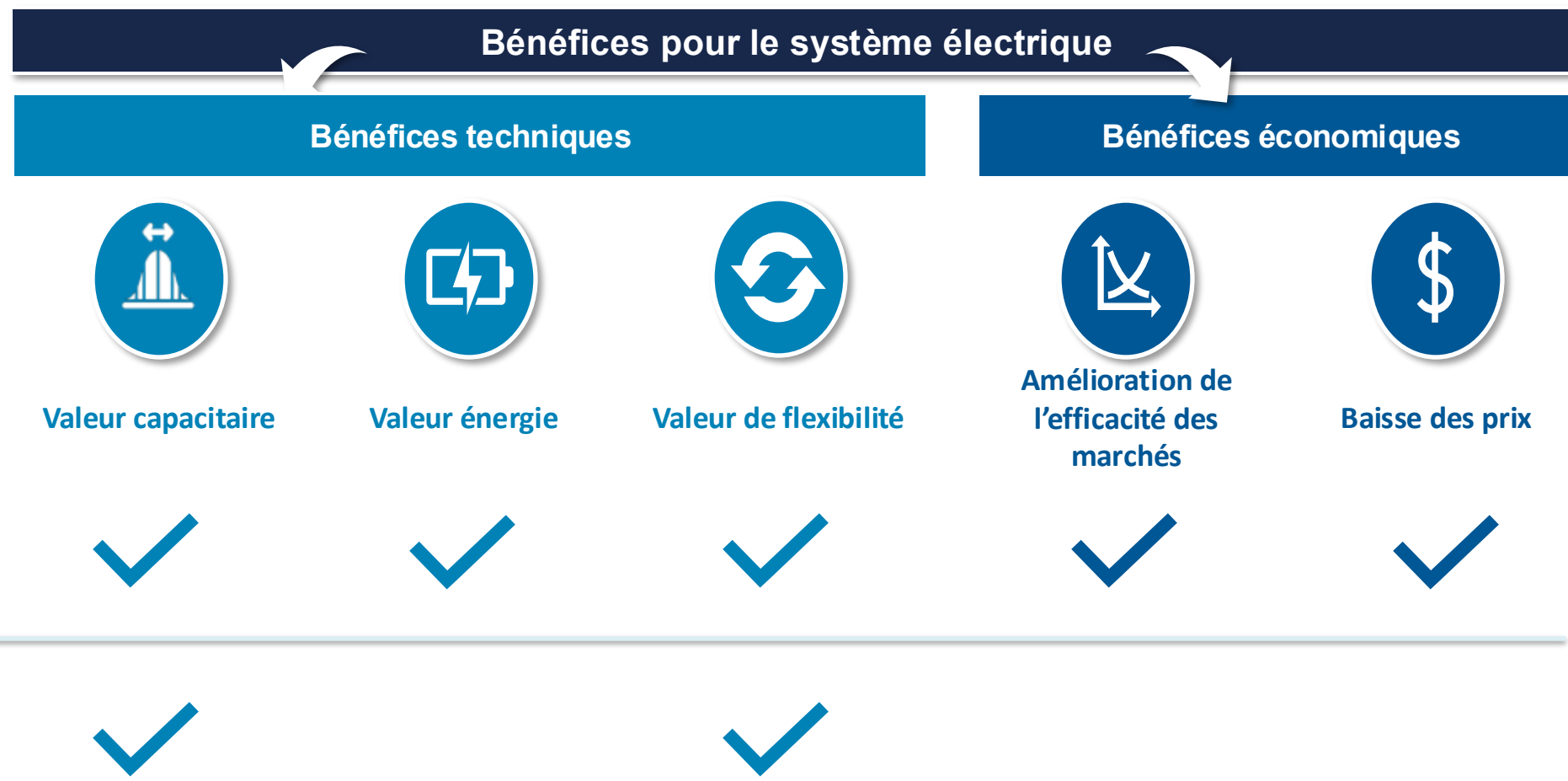
« La politique énergétique vise:

...

- Favorise l'émergence d'une **économie compétitive** ;
- Assure la **sécurité d'approvisionnement** et réduit la **dépendance aux importations** ;
- Maintient un **prix de l'énergie compétitif** ;
- Préserve la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'**aggravation de l'effet de serre** ;

...»

Les bénéfices des flexibilités de la demande



Les bénéfices des flexibilités de la demande

Bénéfices pour la collectivité



Une valeur
environnementale



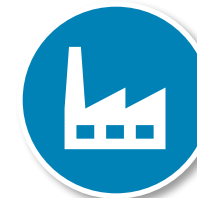
Lutte contre l'aggravation
de l'effet de serre



Une valeur d'indépendance
stratégique



Indépendance stratégique



Une valeur de
compétitivité industrielle



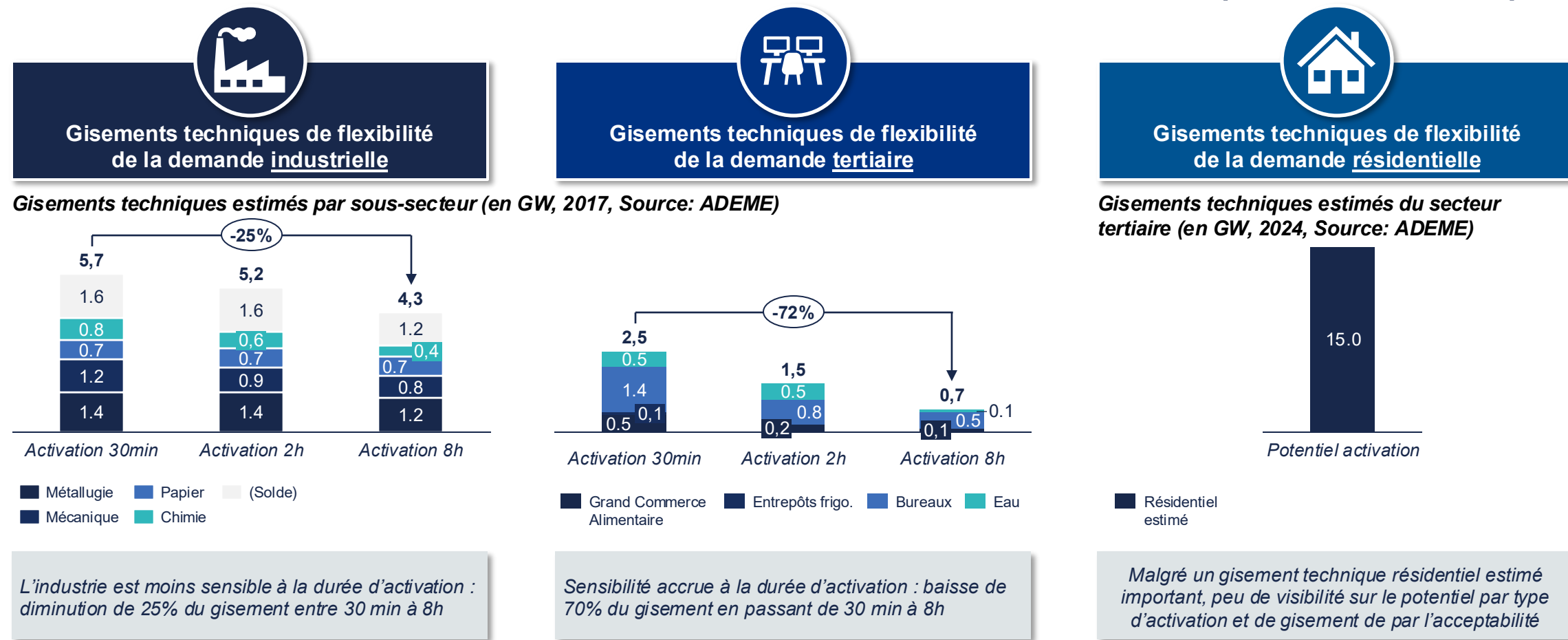
Economie compétitive

3

Gisements principaux de flexibilité



Les gisements techniques de la flexibilité de la demande tertiaire sont plus sensibles à la durée d'activation que ceux industriel (-72% vs -25%)



Les profils de coût d'activation sont également différenciés selon les secteurs et donc le profil de l'entité consommatrice d'énergie



Facteurs clés associé à la flexibilité de la demande industrielle

- ✓ Valeur ajoutée des produits :
 - Industrie aux produits à forte valeur ajoutée (fortes marges) par MWh consommé => compensation élevée demandée pour accepter de la flexibilité
 - Industrie à faible valeur ajoutée => compensation faible demandée
- ✓ Densité temporelle du besoin en énergie
- ✓ Capacité de report de consommation dépendant de la nature de l'industrie (e.g., pour l'industrie agroalimentaire, l'arrêt de frigos 3h n'impacte pas la qualité des produits)



Facteurs clés associé à la flexibilité de la demande tertiaire

- ✓ Peu de consommation par rapport à la valeur ajoutée créée
- ✓ Analyse coût-effacement plus spécifique / au cas par cas
- ✓ Incitations économiques afin d'optimiser la consommation énergétique souvent ignorées
- ✓ Autres éléments perturbateurs influençant la prise de décision en faveur de l'optimisation (e.g., confort de employés, des clients, investissement avec ROI peu visible / lointain)



Facteurs clés associé à la flexibilité de la demande résidentielle

- ✓ Coût de mise en place proportionnellement plus élevé que les autres secteurs (pas d'effet de flotte)
- ✓ Consommation diffuse et plus difficile à appréhender
- ✓ Autres éléments perturbateurs / humains influençant la prise de décision en faveur de l'optimisation (e.g., acceptabilité sociale du pilotage à distance, prix dynamiques, etc.)

Flexibilité facile à activer à grande échelle

Flexibilité difficile à activer à grande échelle

Flexibilité très difficile à valoriser, rationaliser et activer

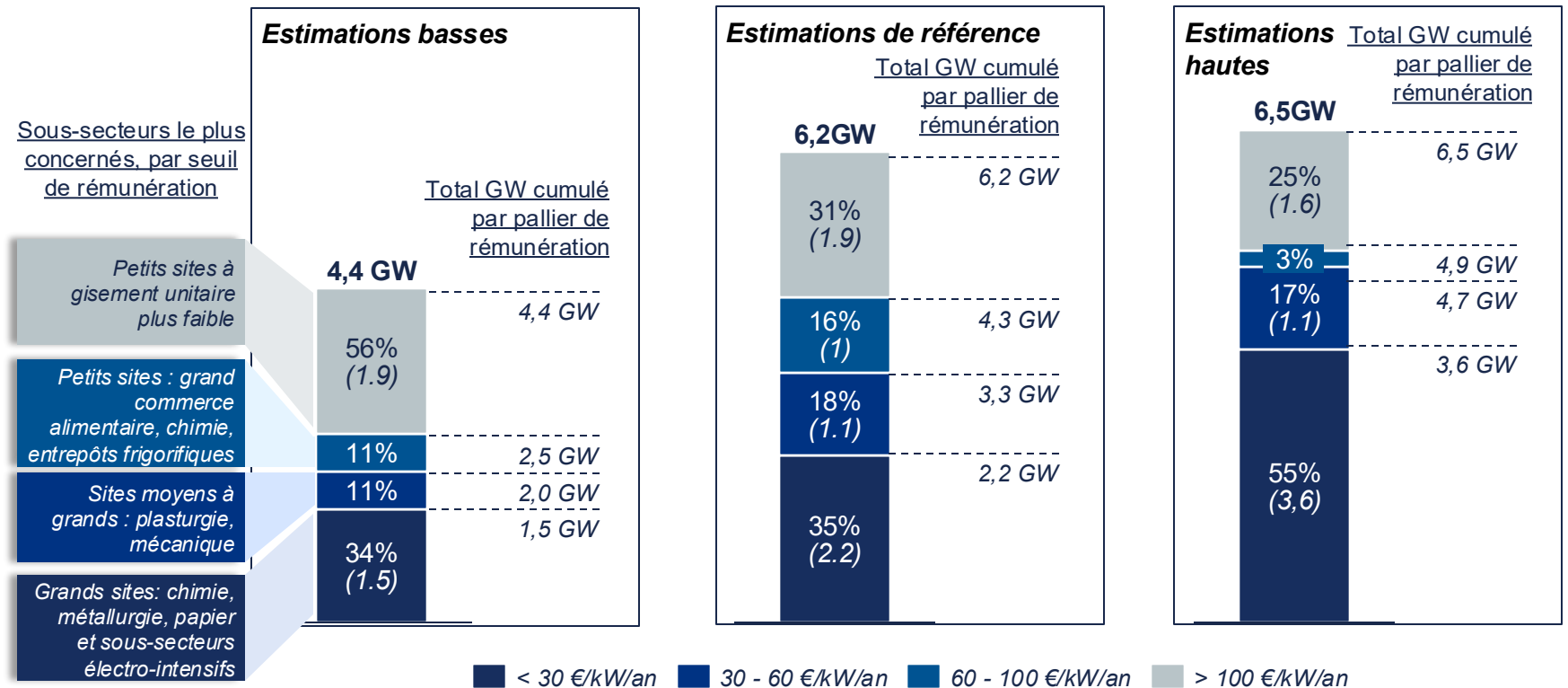
Zoom gisement technico-économique par secteur – Le gisement d'effacement industriel varie de 1,5-3,6GWh à un max de 4,4-6,5GW sur des durées de 30 minutes



Flexibilité de la demande industrielle

- Les 3 scénarios ont été établis selon des variations des parts de puissance effaçable (technique) et des attentes de rémunérations associées à l'effacement (économique - le prix pour lequel ils sont prêt à vendre)

Estimation du gisement technico-économique d'effacement par tranche de rémunération au kW pour les secteurs industriels (en GW d'effacement, par seuil d'euros/kW/an, 2017, Source: ADEME)



Zoom gisement technico-économique par secteur – Le gisement d'effacement tertiaire se concentre au seuil >100€/kW/an, pour un total estimé entre 2,2-3,0GW



Flexibilité de la demande tertiaire

- Les 3 scénarios ont été établis selon des variations des parts de puissance effaçable (technique) et des attentes de rémunérations associées à l'effacement (économique - le prix pour lequel ils sont prêt à vendre)

Sous-secteurs le plus concernés, par seuil de rémunération

Seuil où le gisement tertiaire devient économiquement accessible

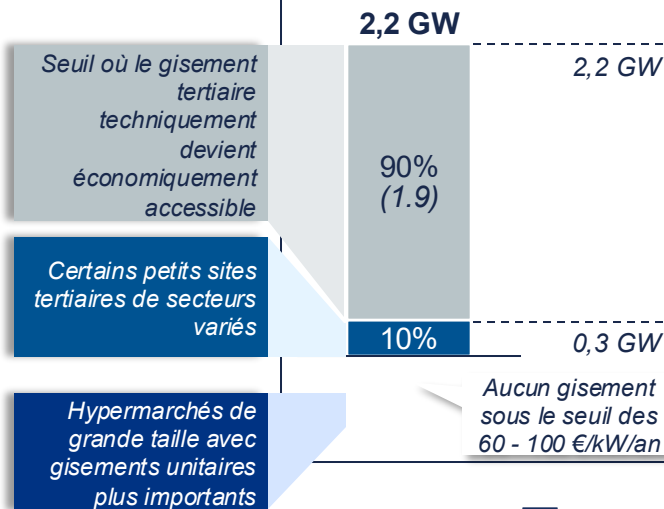
Certains petits sites tertiaires de secteurs variés

Hypermarchés de grande taille avec gisements unitaires plus importants

Estimation du gisement technico-économique d'effacement par tranche de rémunération au kW pour les secteurs industriels (en GW d'effacement, par seuil d'euros/kW/an, 2017, Source: ADEME)

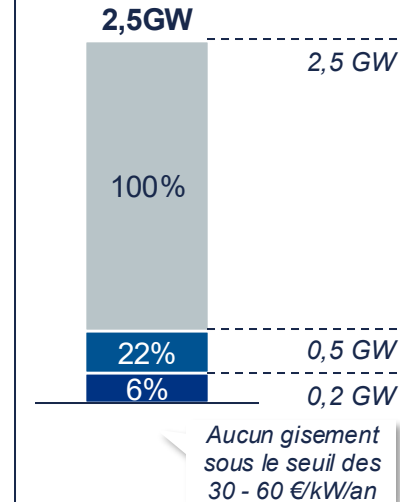
Estimations basses

Total GW cumulé par palier de rémunération



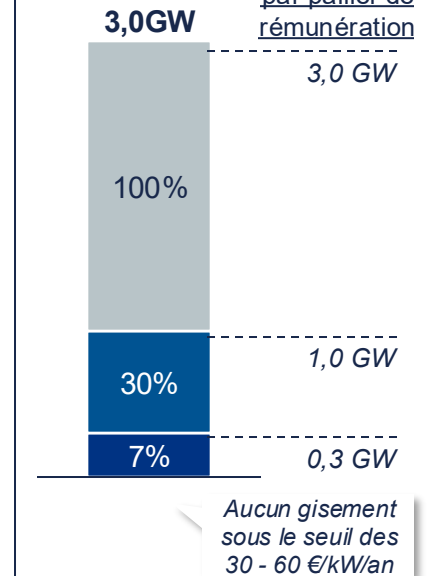
Estimations de référence

Total GW cumulé par palier de rémunération



Estimations hautes

Total GW cumulé par palier de rémunération



■ < 30 €/kW/an ■ 30 - 60 €/kW/an ■ 60 - 100 €/kW/an ■ > 100 €/kW/an

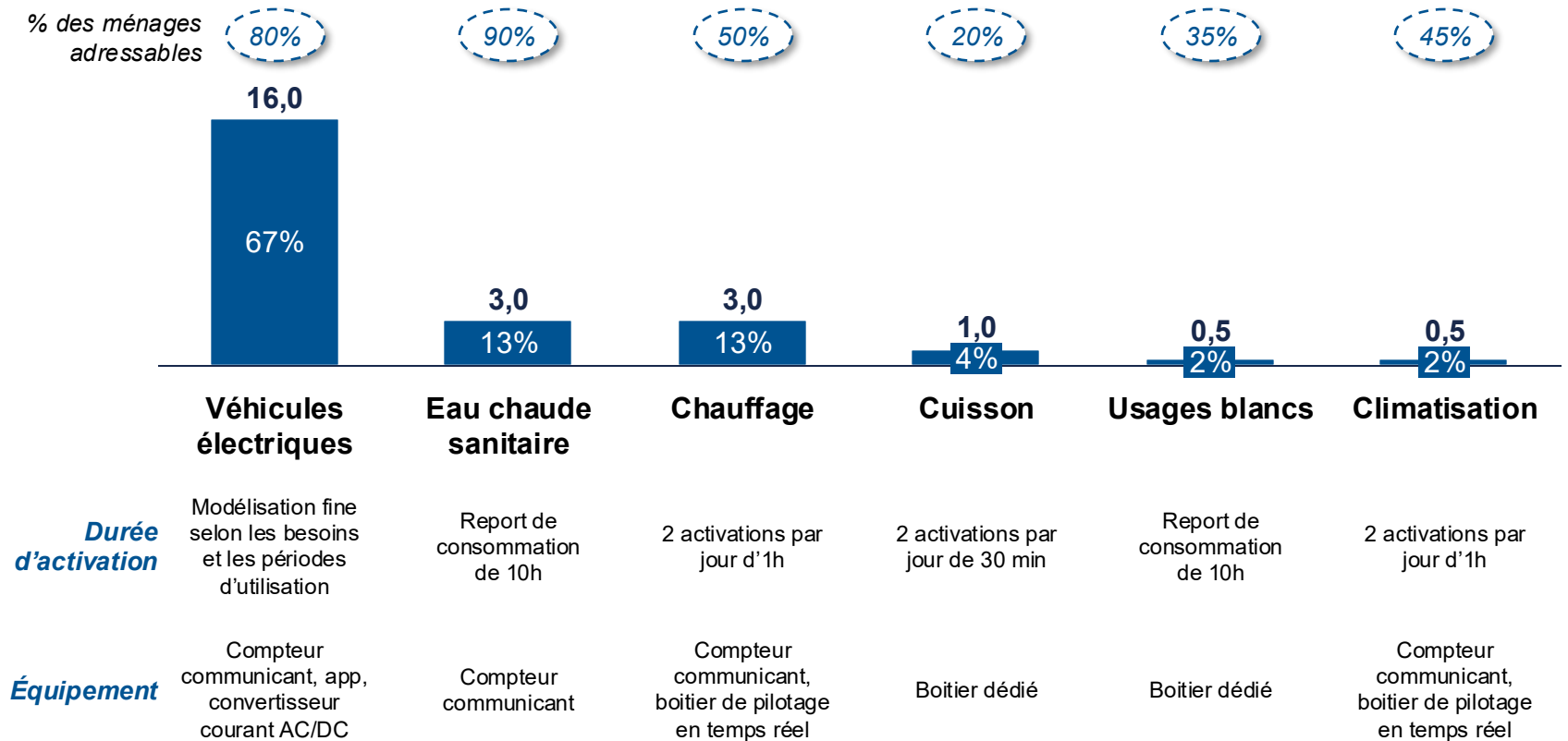
Zoom gisement technico-économique par secteur – Le gisement d’effacement tertiaire le plus significatif se trouve aux véhicules électriques, suivi par l’eau/chauffage



Flexibilité de la demande résidentielle

- Il n'existe pas encore de modèle suffisamment fiable et détaillé pouvant estimer le niveau d'activation, puisqu'il dépend d'énormément de facteurs notamment humains et de coût d'installation

Exemples de gisements de la flexibilité de la demande d'ici 2050
(hypothèse centrale, en GW d'effacement, par seuil d'euros/kW/an, 2020, Source: RTE)









4

Les alternatives à la flexibilité de la demande



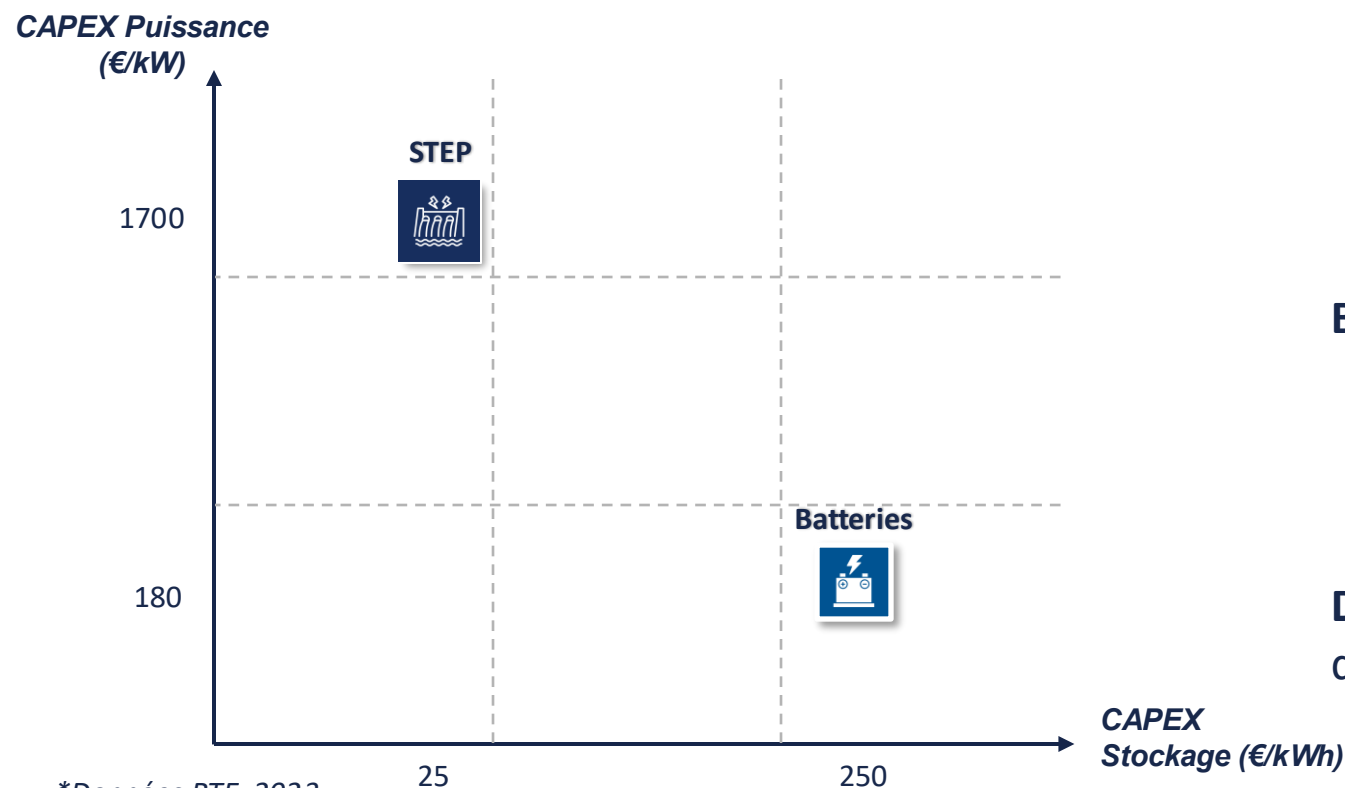
Les moyens de production

| | Centrale thermique | VS | Flexibilité de la demande |
|---|---|----|---|
| Pilotabilité (Durée de démarrage/Taux de montée en puissance) |  | |  |
| Stock d'énergie (Durée potentiel d'une activation) |  | |  |
| Coût d'investissement | 450 €/kW (TAG)* | | Variable en fonction du gisement visé |
| Coût d'opération | Volatile | | Nul pour les premiers MW puis croissant |
| Emissions de CO2 |  | |  |

*Données Cour des Comptes, 2021

Les moyens de stockage

Coût d'investissement des moyens de stockage



*Données RTE, 2023

STEP : Stocks d'énergie importants

- Activations longues (de quelques heures à des dizaines d'heures)
- Flexibilités structurelles et régulières + Dynamique

Batteries: Stocks d'énergie faible

- Activations courtes (de quelques minutes à quelques heures)
- Flexibilités dynamiques + d'équilibrage

Demande: Epuisement du gisement pour les besoins d'activations supérieurs à quelques heures



5

Valorisation de la flexibilité de la demande

3 types de services de la flexibilité

On peut catégoriser la valorisation de la flexibilité en tant que trois services réseau :

1. Capacité
2. Energie
3. Gestion réseau

Mécanismes de rémunération de la flexibilité de la demande par RTE :

| | | | | |
|--------------------|--|---------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Réserve primaire | Mécanisme de capacité | Interruptibilité | Mécanisme d'ajustement | Activation réserve primaire |
| Réserve secondaire | Appel d'offres Réserves Rapide et Complémentaire | Appel d'offres effacement | NEBEF | Activation réserve secondaire |

1 : Service de capacité

De loin le service le plus rémunéré :

| | | | | |
|--------------------|--|---------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Réserve primaire | Mécanisme de capacité | Interruptibilité | Mécanisme d'ajustement | Activation réserve primaire |
| Réserve secondaire | Appel d'offres Réserves Rapide et Complémentaire | Appel d'offres effacement | NEBEF | Activation réserve secondaire |

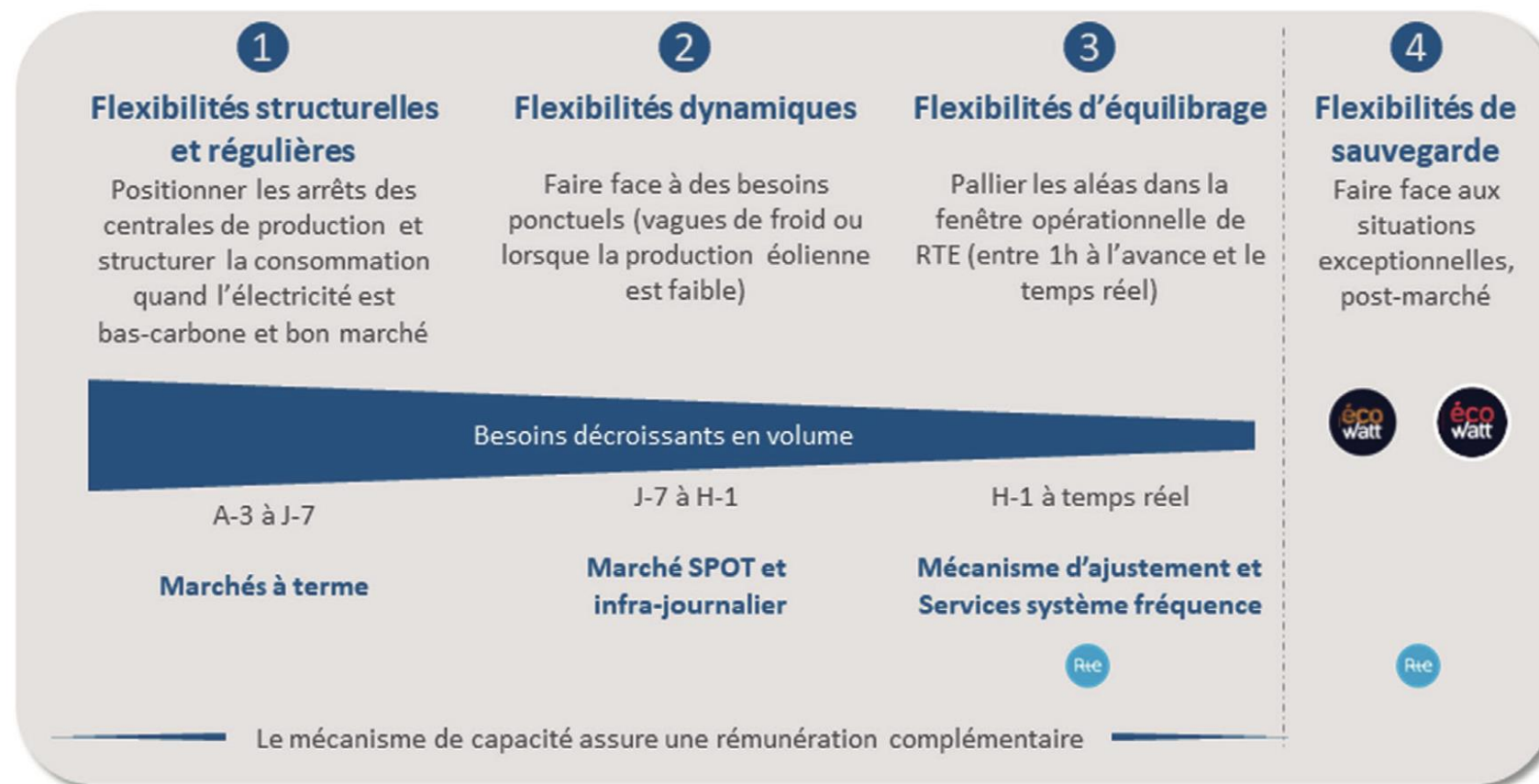
■ €/MW

■ €/MWh

1 : Service de capacité

Pourtant :

1. Moins pertinente



1 : Service de capacité

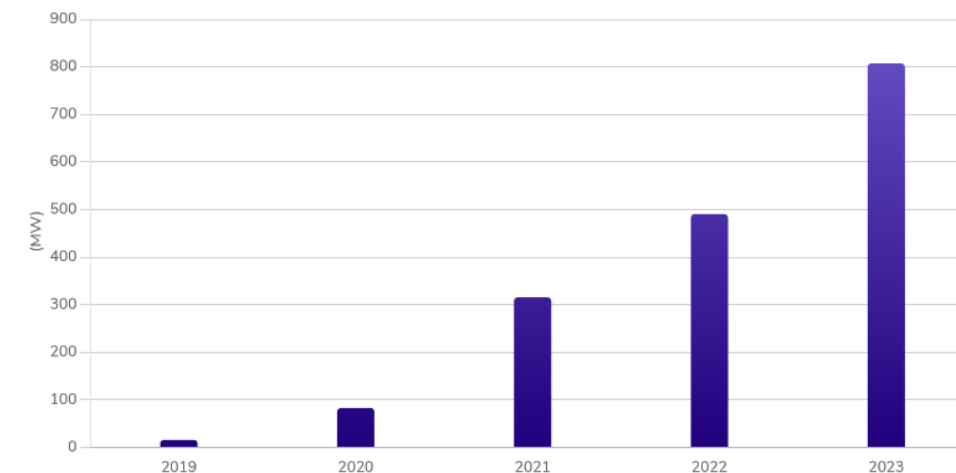
Pourtant :

1. Moins pertinente
2. Marché saturé
 - a) Pointes de consommation plus faibles
 - b) Arrivée des batteries

Évolution des pics de consommation d'électricité en France entre 1990 et 2023



Puissance installée des batteries



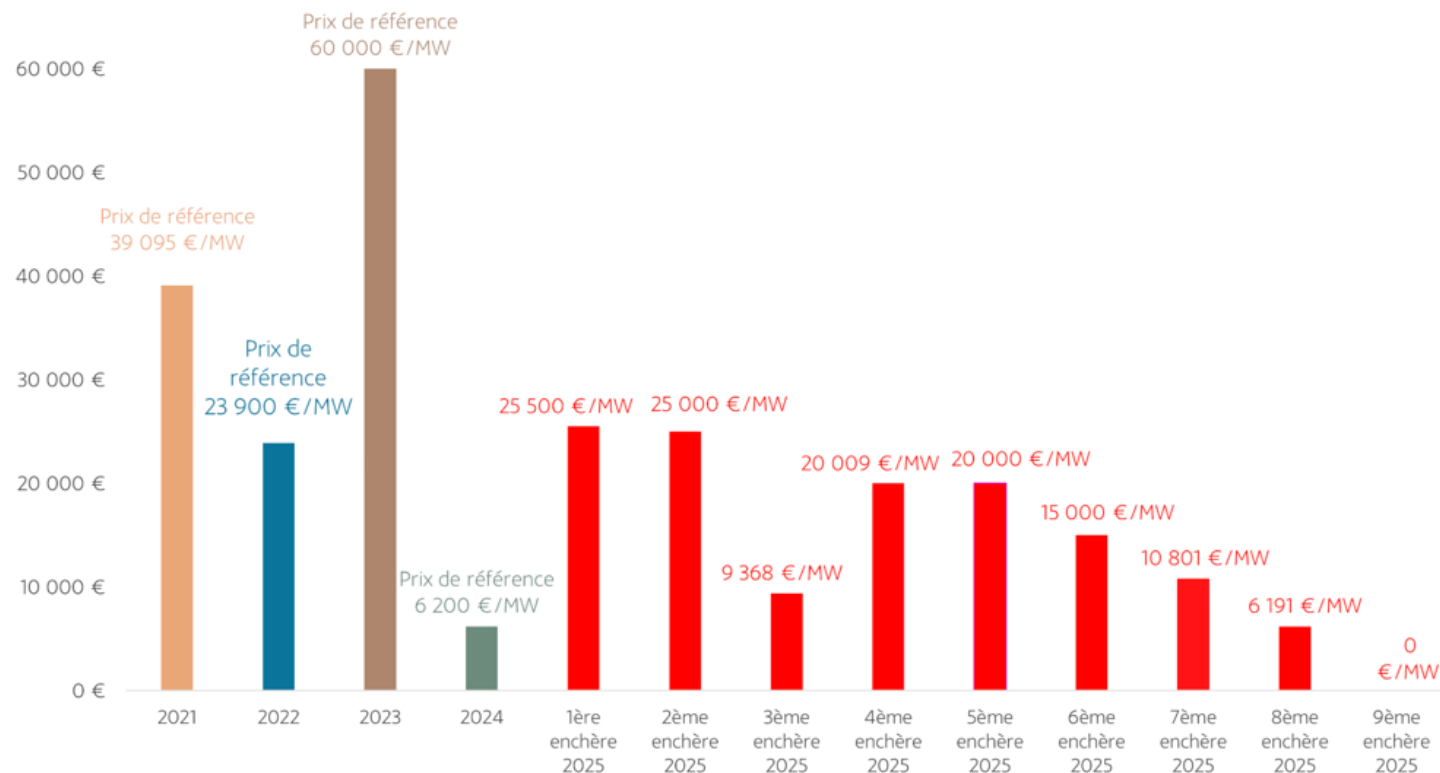
Dernière mise à jour le : 12 juin 2024 à 10:05

1 : Service de capacité

Pourtant :

1. Moins pertinente
2. Marché saturé
 - a) Pointes de consommation plus faibles
 - b) Arrivée des batteries

Évolution du prix des garanties de capacité en €/MW

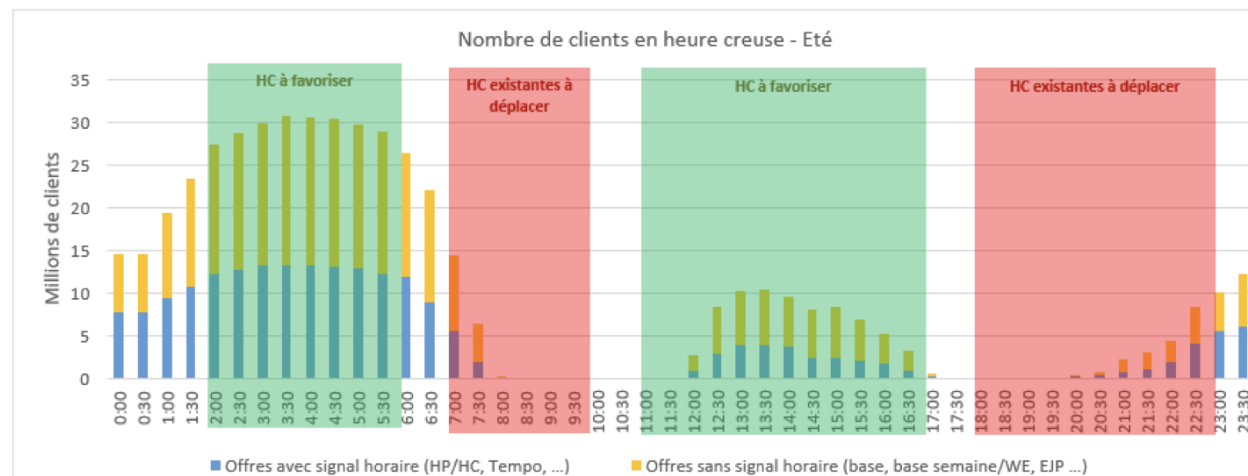
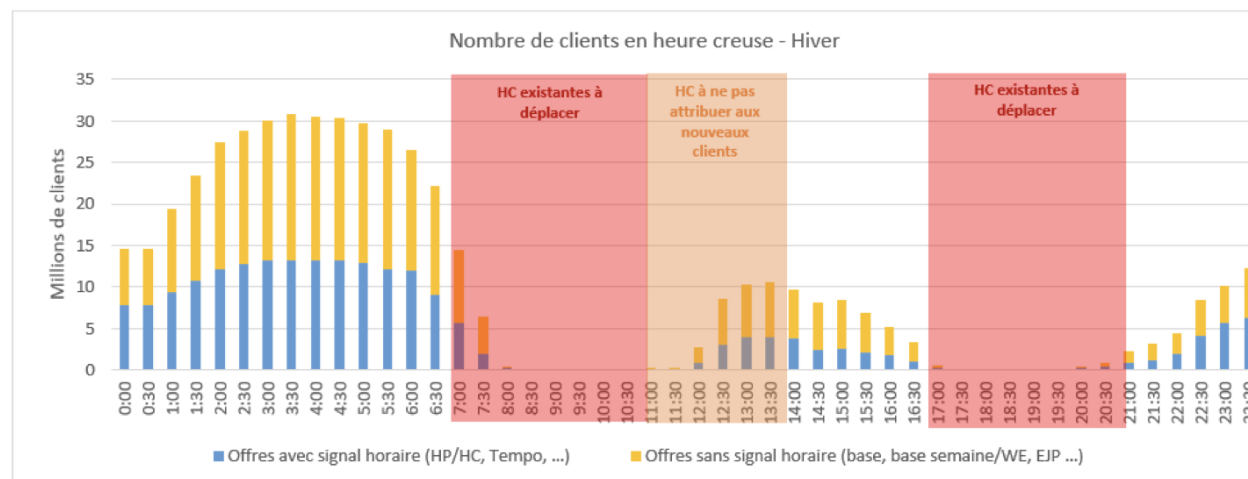


Source : Acciona Energia

2 : Gestion de la congestion – trois façons d'utiliser la flexibilité de la demande

Les gestions de congestion réseau = 272 M € pour RTE en 2023, coût qui ne cesse d'augmenter : + 87 M€ vs 2022. Mobiliser la flexibilité de la demande via différents leviers :

1. Inciter la demande à mieux se répartir temporellement
 - a) Lisser les passages des HC / HP
 - b) Mieux répartir les HC / HP en fonction des saisons



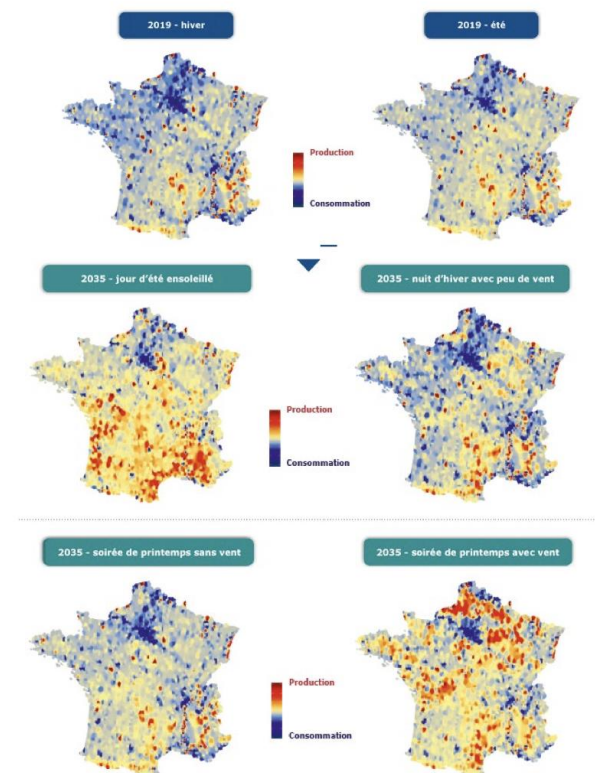
Evolution prévisionnelle entre 2019 et 2035 de l'équilibre entre la production et la consommation locales d'électricité. Source : RTE, SDDR 2019

2 : Gestion de la congestion – trois façons d'utiliser la flexibilité de la demande

Les gestions de congestion réseau = 272 M € pour RTE en 2023, coût qui ne cesse d'augmenter : + 87 M€ vs 2022

Mobiliser la flexibilité de la demande via différents leviers :

1. Inciter la demande à mieux se répartir temporellement
 - a) Lisser les passages des HC / HP
 - b) Mieux répartir les HC / HP en fonction des saisons
2. Inciter la demande à mieux se répartir géographiquement
 - a) Ajuster le coût de raccordement
 - b) Séparer le marché en des zones avec un différentiel de prix
Passer d'un marché zonal à un marché nodal
3. Inciter une meilleure inclusion de la flexibilité par les GRT/D
 - a) Réformer la rémunération de la rémunération des GRT/D ?



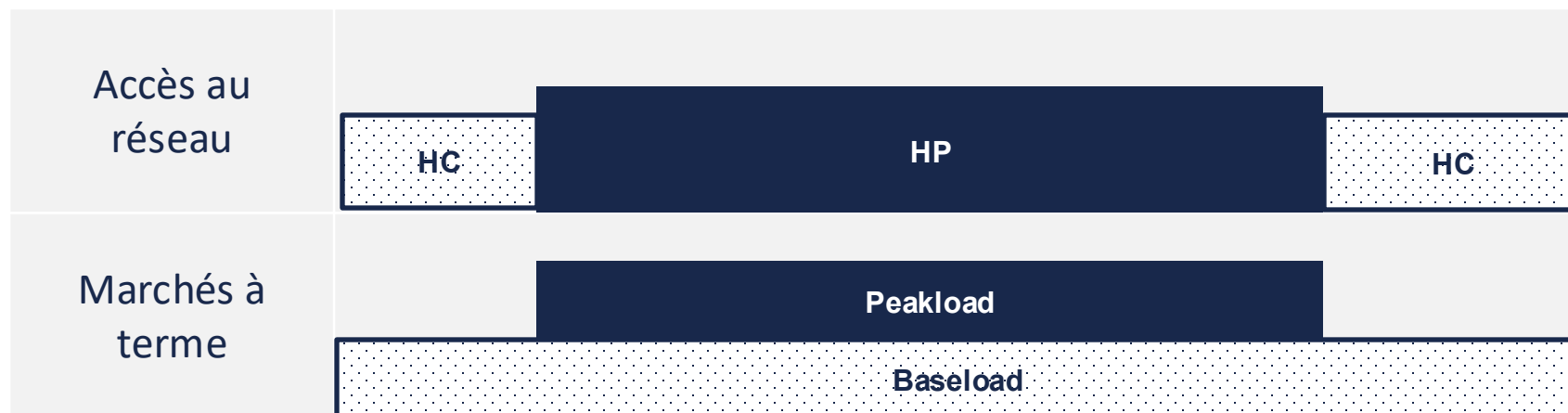
[Evolution prévisionnelle entre 2019 et 2035 de l'équilibre entre la production et la consommation locales d'électricité. Source : RTE, SDDR 2019](#)

3 : Composante énergie – Manque d’incitations

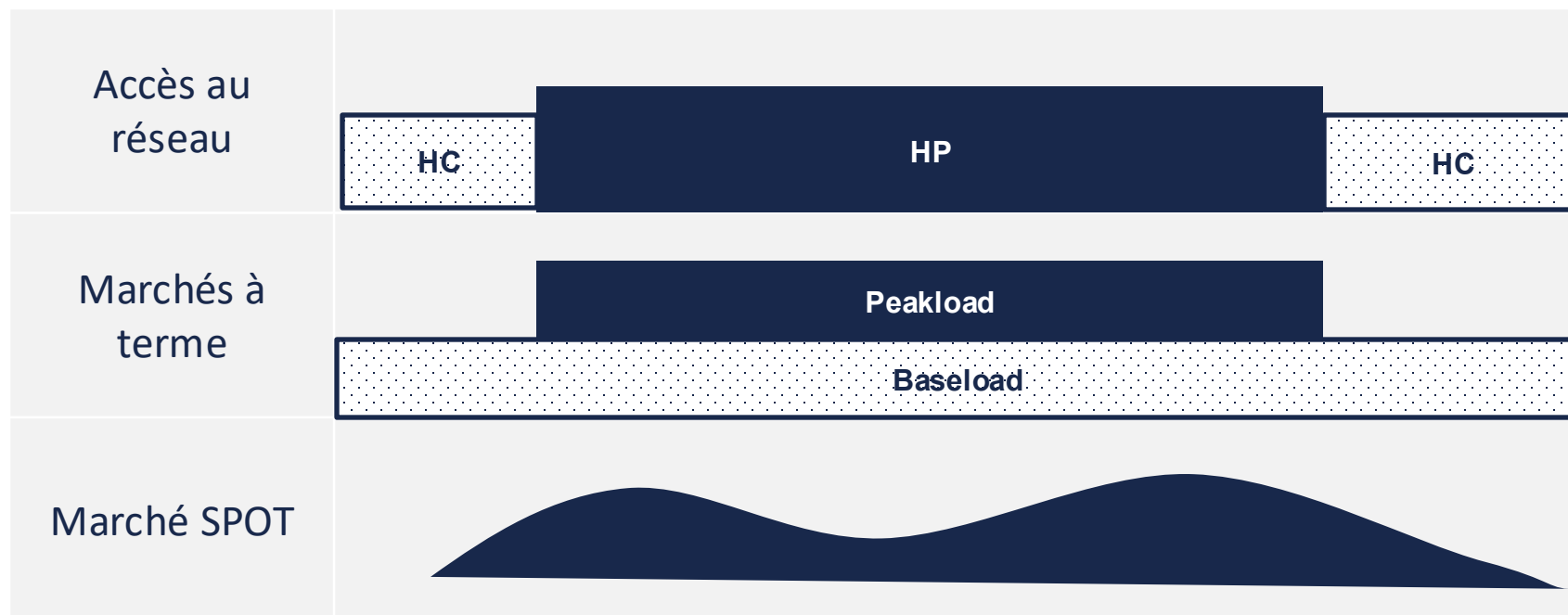
3 : Composante énergie – Manque d’incitations



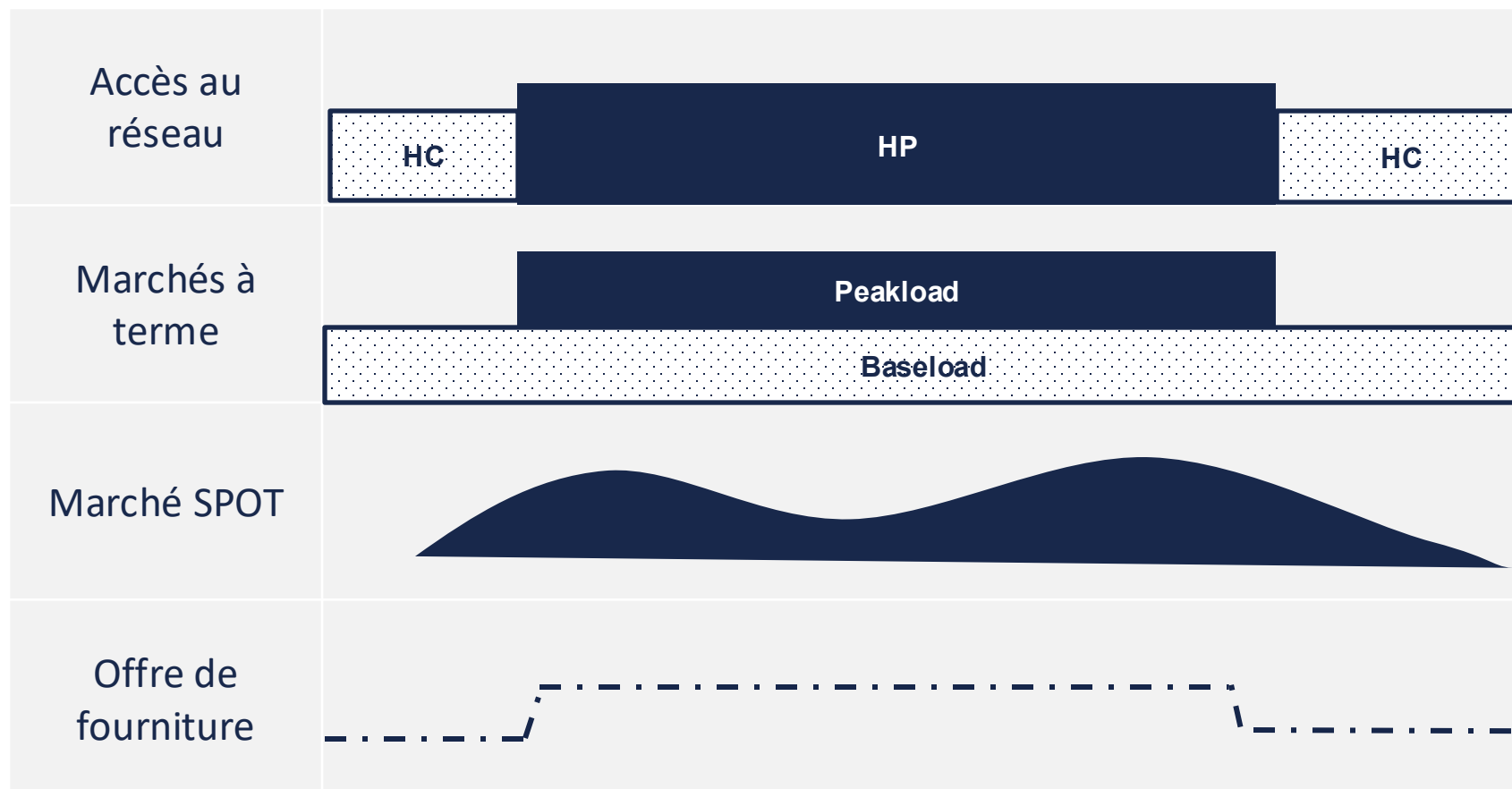
3 : Composante énergie – Manque d’incitations



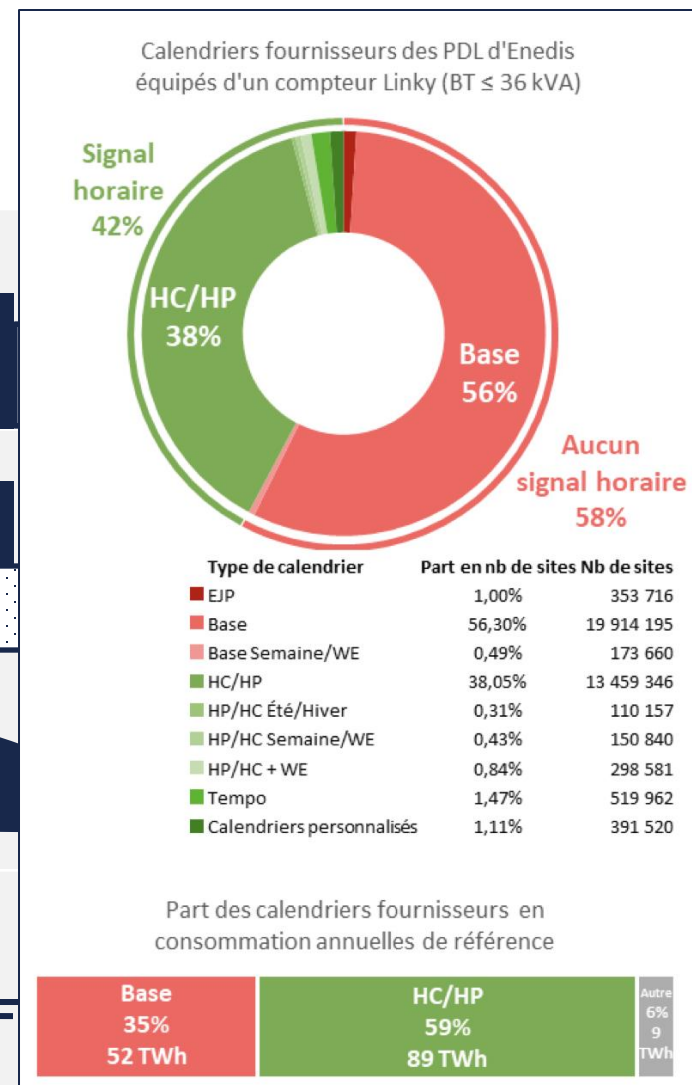
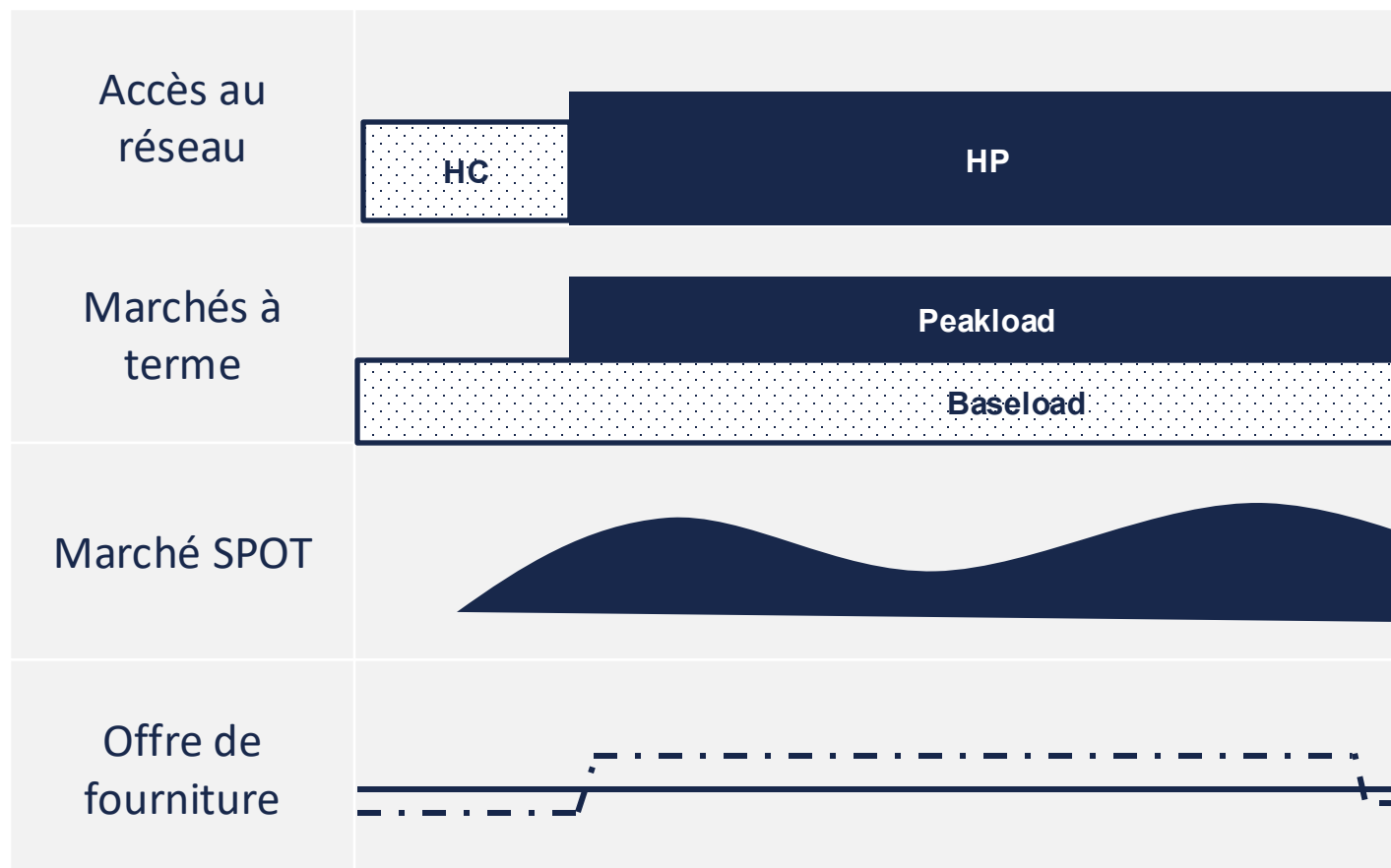
3 : Composante énergie – Manque d’incitations



3 : Composante énergie – Manque d’incitations

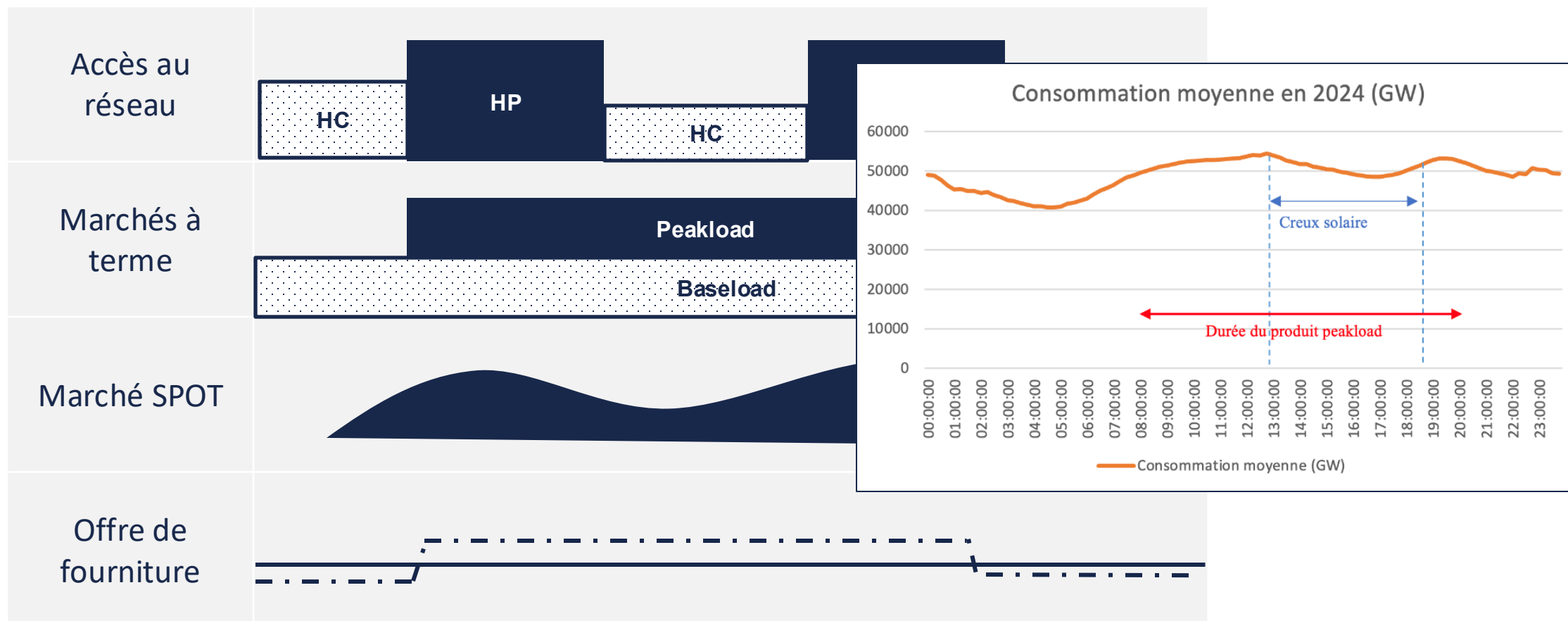


3 : Composante énergie – Manque d'incitations

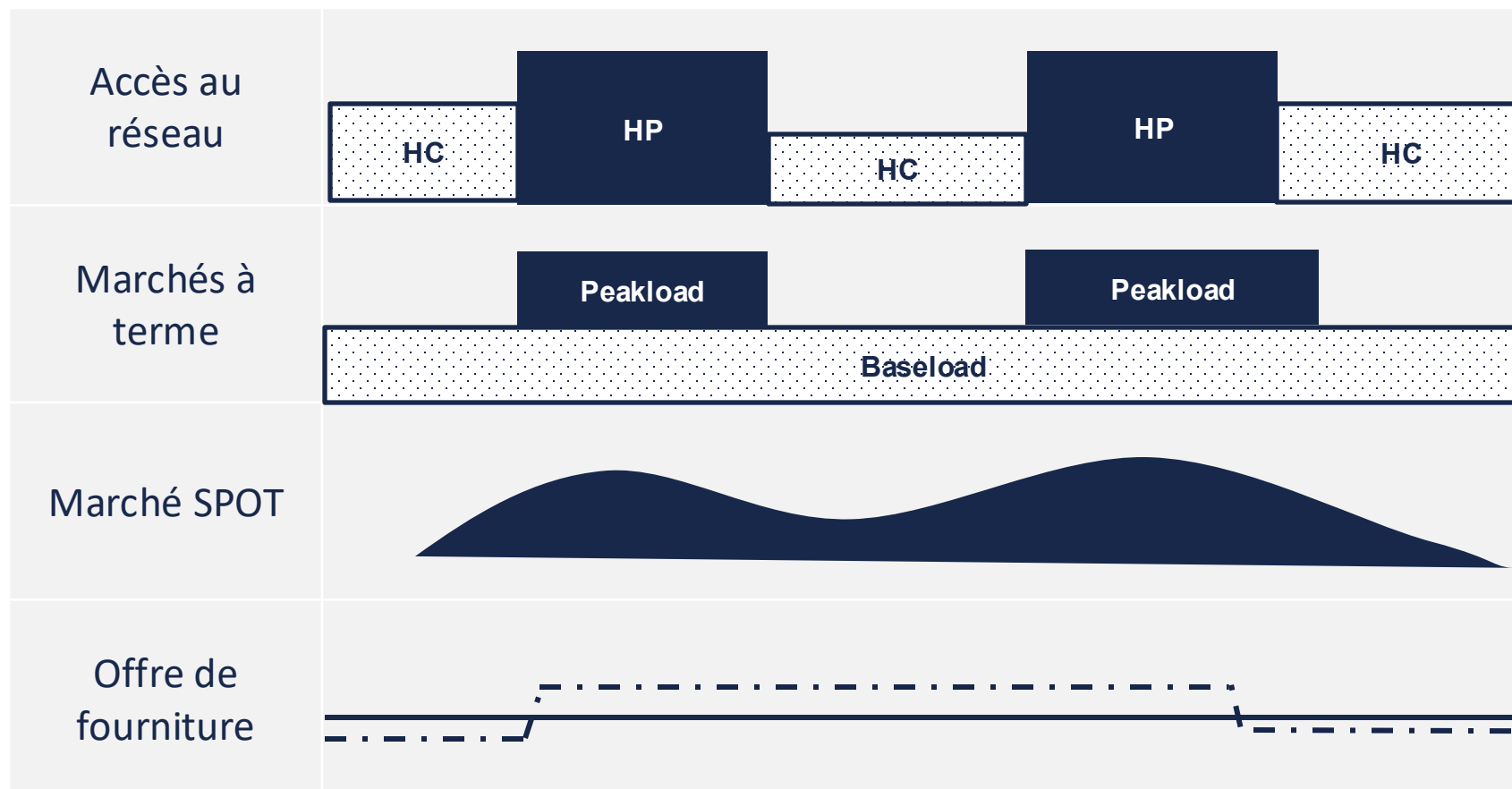


Evolution prévisionnelle entre 2019 et 2035 de l'équilibre entre la production et la consommation locales d'électricité. Source : RTE, SDDR 2019

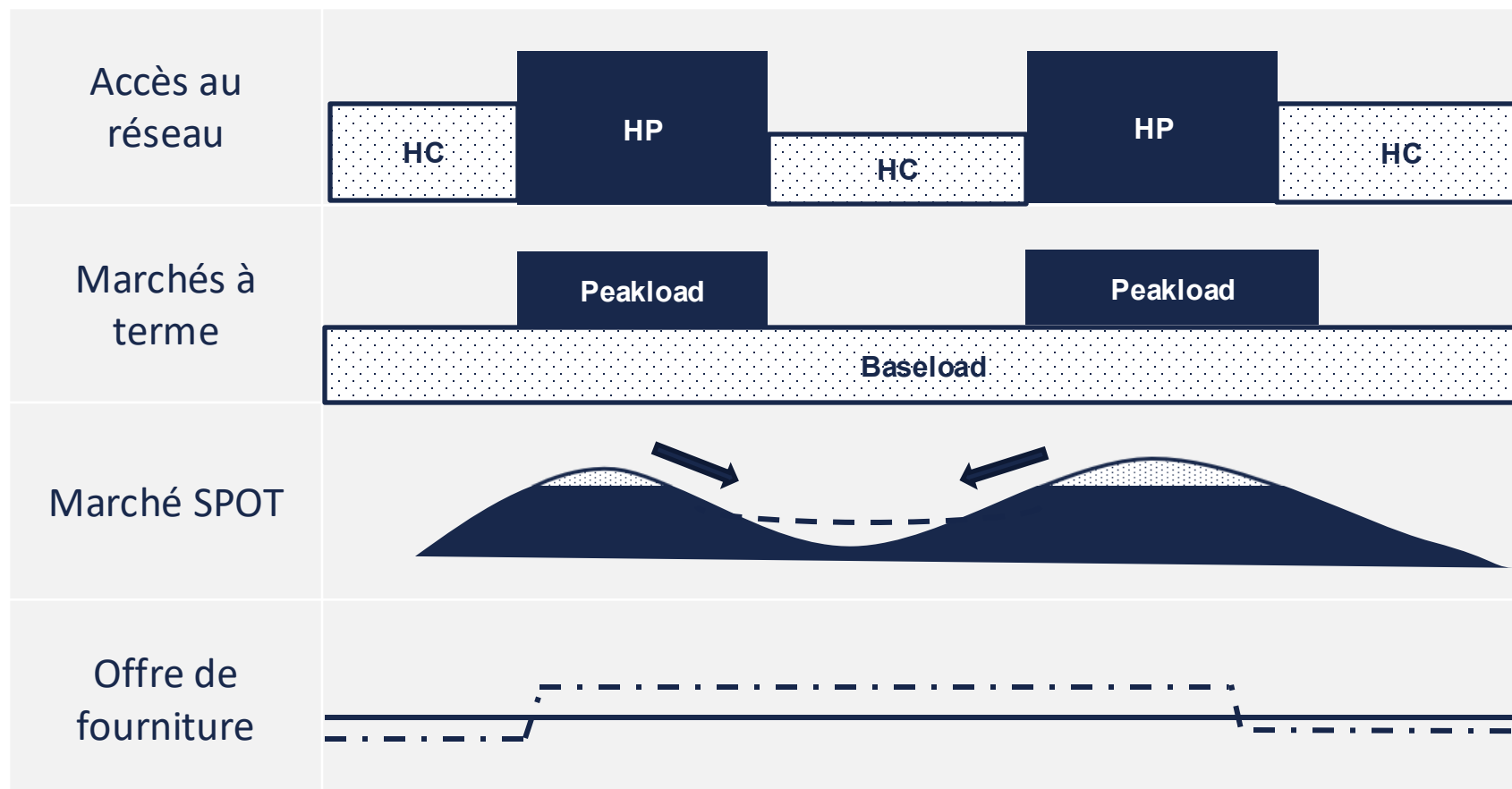
3 : Composante énergie – Manque d’incitations



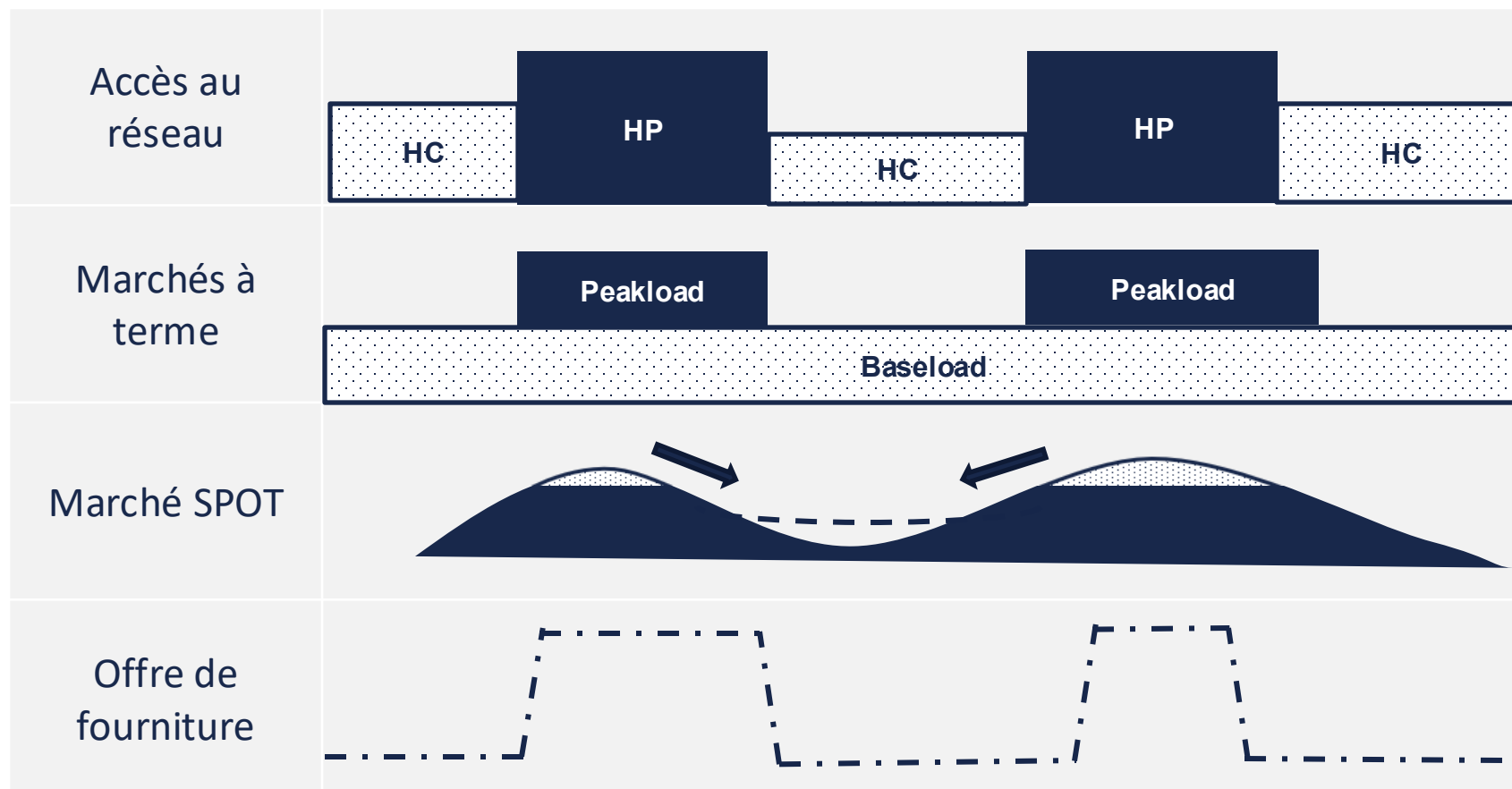
3 : Composante énergie – Manque d’incitations



3 : Composante énergie – Manque d’incitations

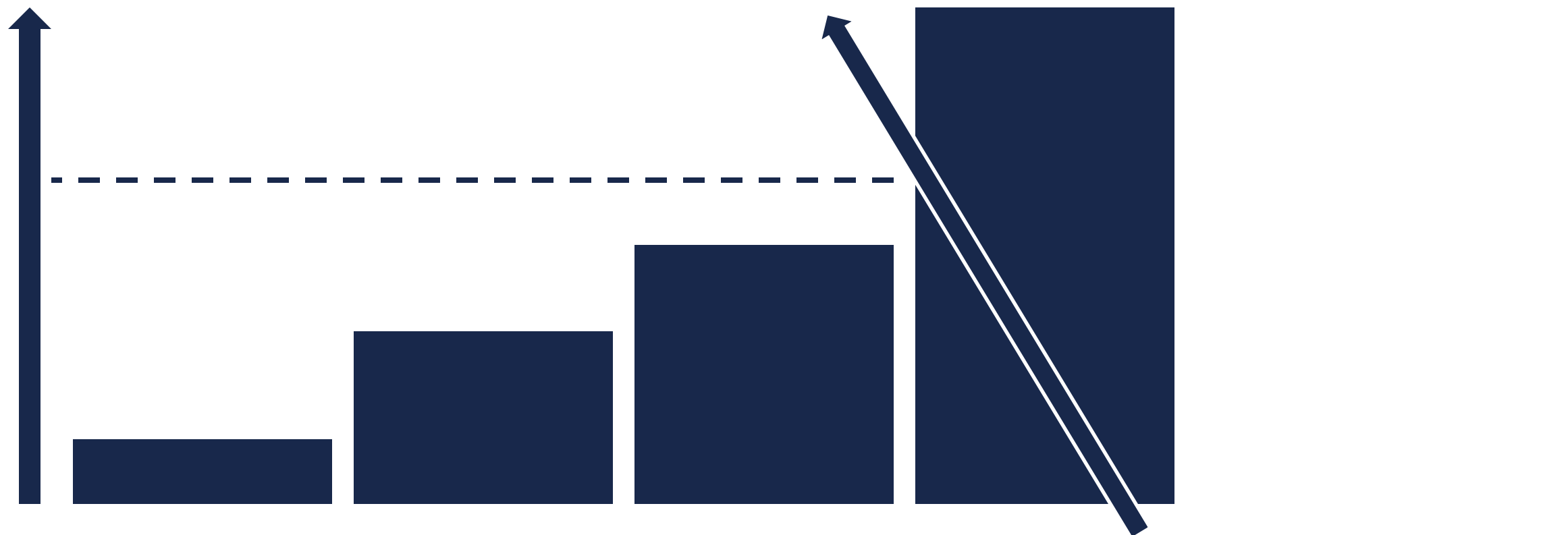


3 : Composante énergie – Manque d’incitations



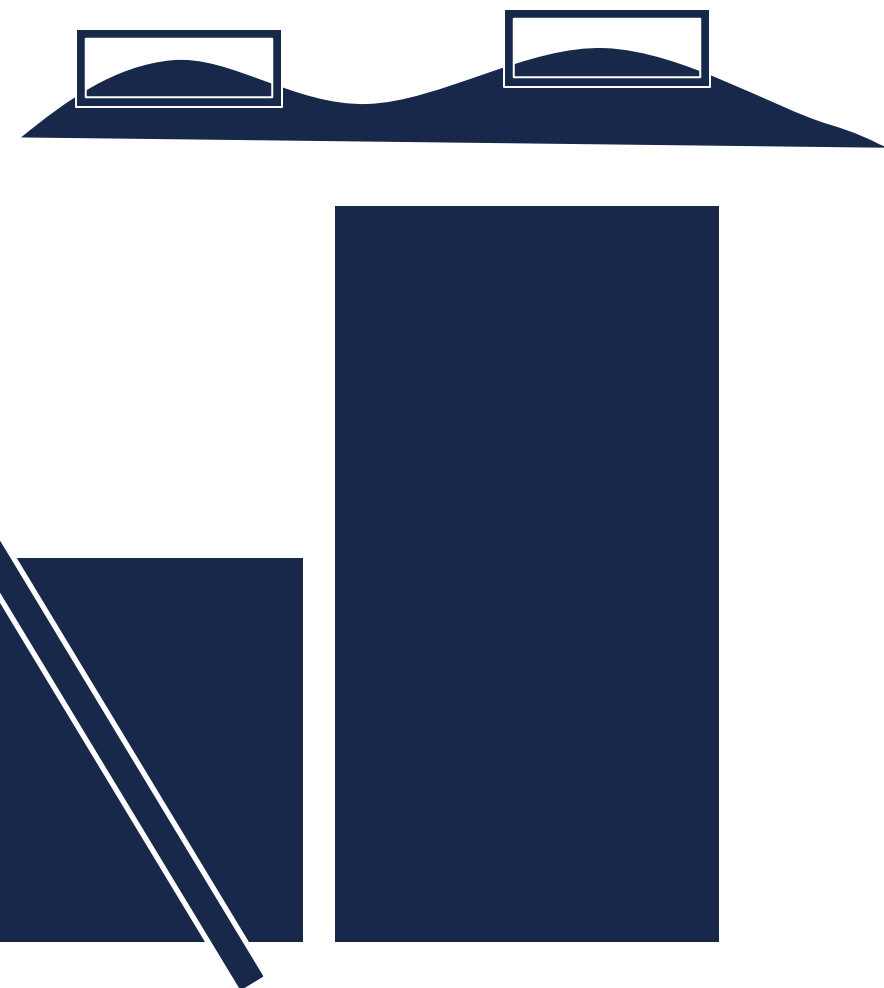
3. Composante énergie : marché SPOT – réformer le NEBEF

Augmenter la flexibilité du NEBEF



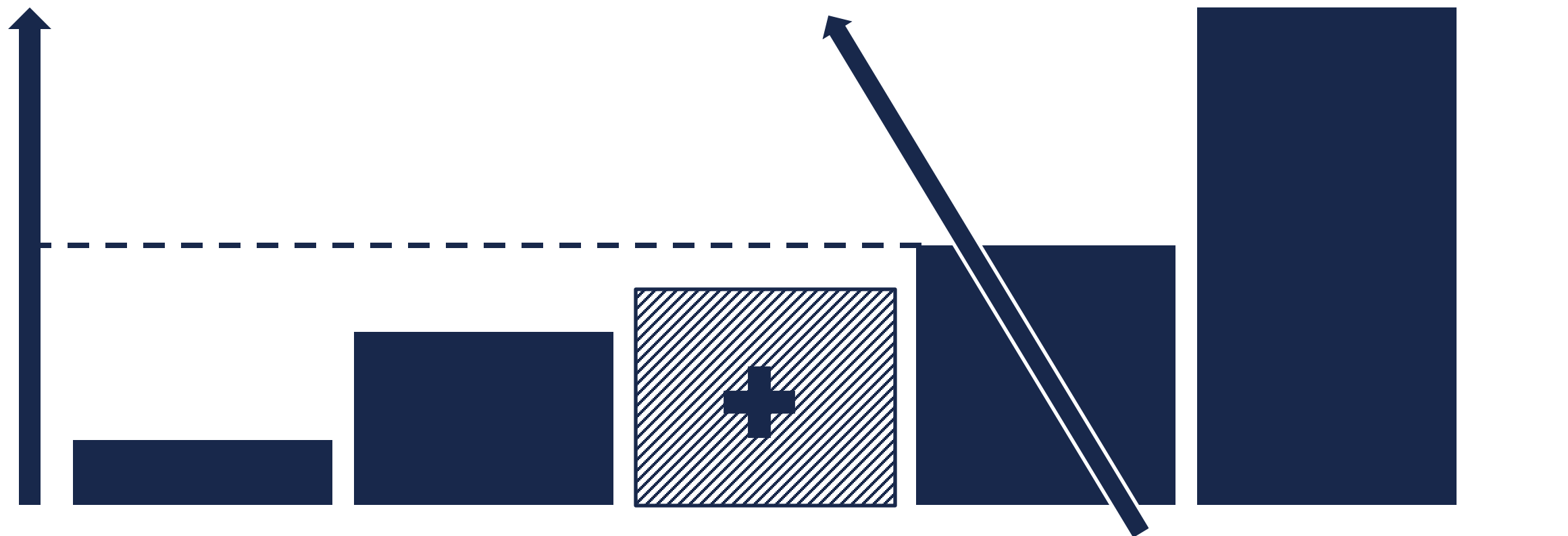
3. Composante énergie : marché SPOT – réformer le NEBEF

Augmenter la flexibilité du NEBEF



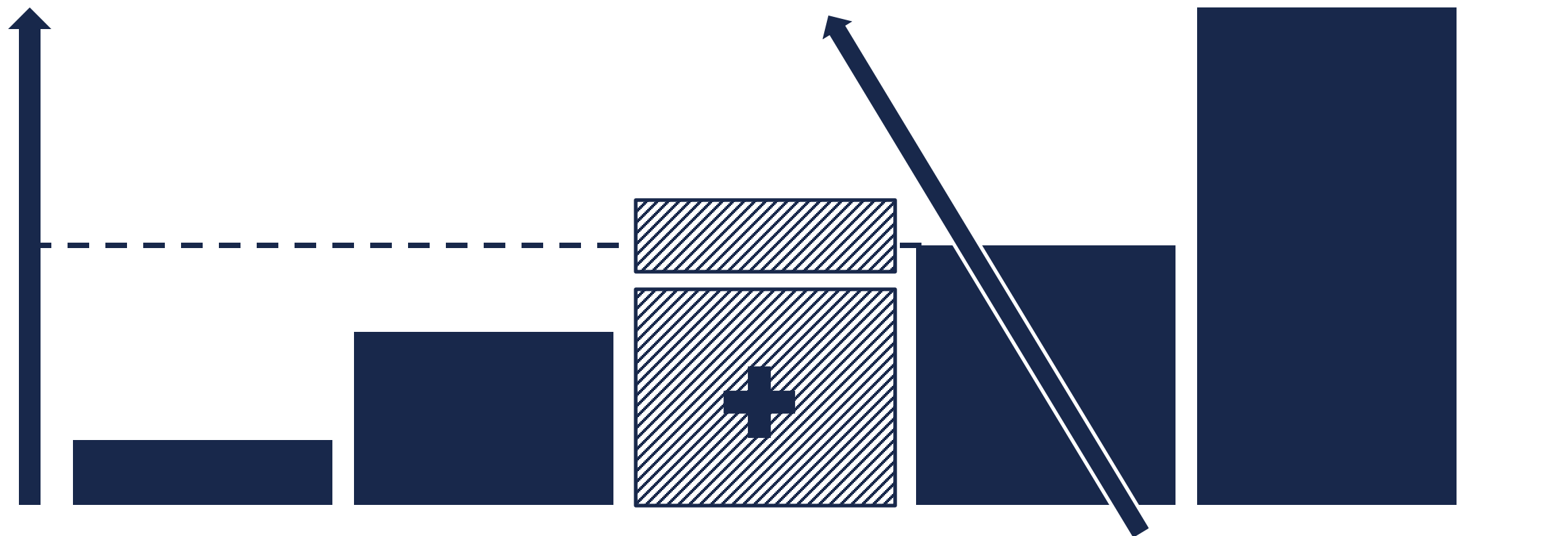
3. Composante énergie : marché SPOT – réformer le NEBEF

Augmenter la flexibilité du NEBEF



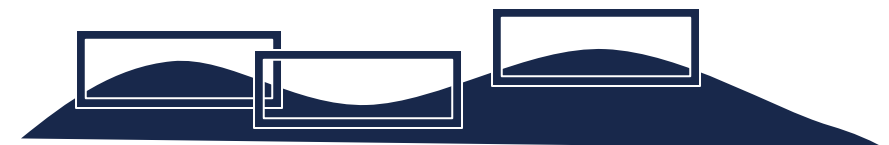
3. Composante énergie : marché SPOT – réformer le NEBEF

Augmenter la flexibilité du NEBEF

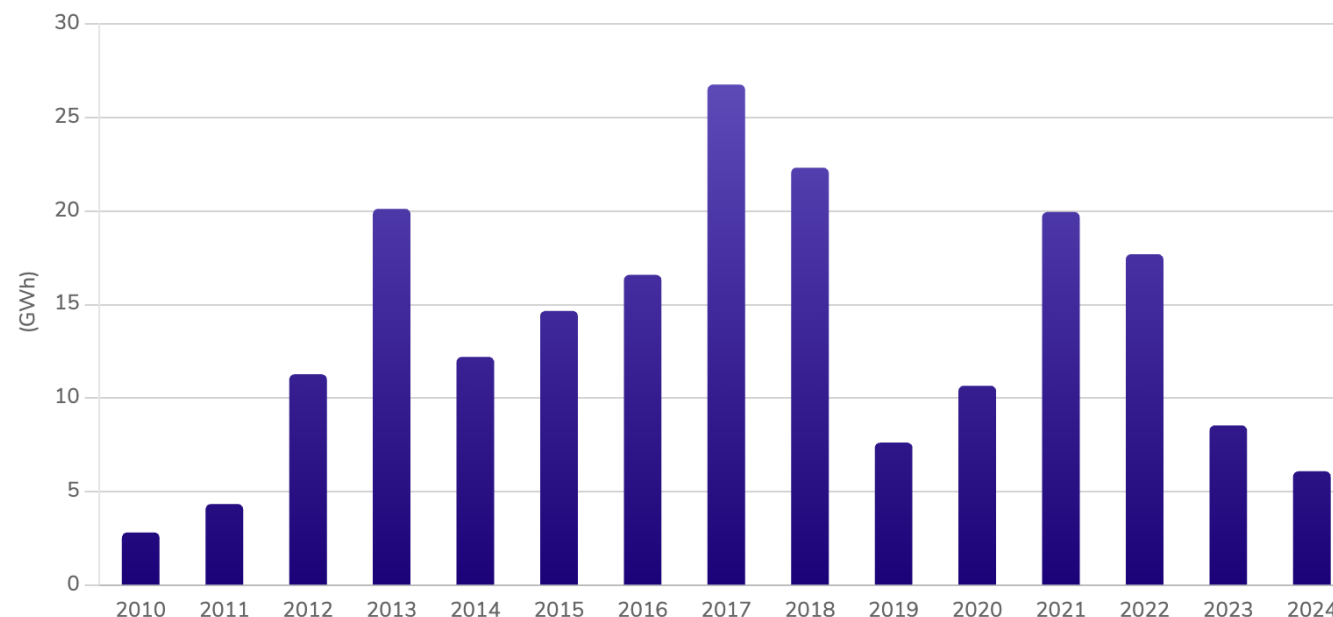


3. Composante énergie : marché SPOT – réformer le NEBEF

Déterminer un barème de versement approprié



Effacements activés sur le mécanisme d'ajustement



Dernière mise à jour le : 19 décembre 2024 à 14:22

6

Quel acteur pour valoriser
la flexibilité ?



Quels sont les facteurs qui influent la réactivité de la demande au prix ?



Durée de préavis

Envoyer des signaux de prix long terme permet l'adaptation du consommateur.



Régularité

La régularité d'un signal prix favorise aussi l'adaptation du consommateur.



Coût de transaction

Consommateur : Coût d'information régulier sur l'évolution des prix
Fournisseur : Coût d'incertitude relatif à la réaction du consommateur



Acceptabilité sociale

Pour un bien essentiel, répercuter un certain niveau de fluctuations de prix pose des questions d'équité.

Les agrégateurs de flexibilités : quelle valeur ajoutée ?

Rôle des agrégateurs de flexibilités

- Constitution et valorisation d'un portefeuille de capacités flexibles sur les marchés
- Pilotage des consommateurs et suivi des signaux de prix

Avantages

- Réduction du délai de préavis
- Réduction du coût de transaction

Types de flexibilités

- Flexibilités d'équilibrage
- Flexibilités dynamiques



7

Conclusion

Conclusion

Flexibilités de la demande et équilibre du système électrique : quels sont les leviers les plus pertinents ?

