



SEPT.
2017

L'EFFACEMENT DE CONSOMMATION ELECTRIQUE EN FRANCE

EVALUATION DU POTENTIEL
D'EFFACEMENT PAR MODULATION DE
PROCESS DANS L'INDUSTRIE ET LE
TERTIAIRE EN FRANCE METROPOLITAINE

Rapport final

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie



REMERCIEMENTS

L'ADEME et le groupement des entreprises E-CUBE Strategy Consultants et CEREN tiennent à remercier les membres du Comité de pilotage mentionnés ci-dessous :

- **Marion BERTHOLON**, Services Réseaux et Energies Renouvelables, ADEME
- **Frédéric STREIFF**, Service Entreprises et Dynamiques Industrielles, ADEME
- **David MARCHAL**, Direction Productions et Energies Renouvelables, ADEME
- **Alexandre BOUCHET**, Directeur Associé, E-CUBE Strategy Consultants
- **Julie-Anne FOUCHER**, Consultant, E-CUBE Strategy Consultants
- **Alexandre HOFFER**, Manager, E-CUBE Strategy Consultants
- **Bruno MILLET**, Directeur, CEREN
- **Pierre SORLIER**, Direction Générale des Entreprises, (DGE)
- **Nicolas PERON**, Direction Générale de l'Energie et du Climat, (DGEC)
- **Nicolas CREON**, Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux, (A3M)
- **Sylvain LENET**, Confédération de l'industrie des papiers cartons cellulose (Copacel)
- **Frédéric Guillet**, Centre Technique du Papier (CTP)
- **Cyril Mounier**, Association Française de l'Aluminium (AFA)
- **Franck CHARTON et Hervé DUCLOS**, Association Technique du commerce et de la distribution (PERIFEM)
- **Yves LENAIN**, Union des Industries Chimiques (UIC)
- **Marc MADEC**, Fédération de la Plasturgie
- **Pascale LEPRETRE et Olivier Vasseur**, Fédération Forge Fonderie
- **Aude RIGARD-CERISON, Benjamin GUEDOU, Olivier HOUVENAGEL**, RTE
- **David EPELBAUM et Marie-Hélène BRIANT**, Commission de Régulation de l'Energie (CRE)
- **Robin OSMONT**, Union Française de l'Electricité (UFE)
- **Sofia ELASRI et Gildas BARREYRE**, Union des industries utilisatrices d'énergie (UNIDEN)
- **Julien ADAM**, Association Technique Energie Environnement, (ATEE)

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, E-CUBE Strategy Consultants, CEREN. 2017. L'effacement de consommation électrique en France. 179 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne sur : www.ademe.fr/effacement-consommation-electrique-france

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 16MAR000258

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : E-CUBE Strategy Consultants, CEREN

Coordination technique - ADEME : Marion BERTHOLON & Frédéric STREIFF

Direction/Service : Direction Production et Energies Durables / Service Réseaux et Energies Renouvelables - Service Entreprises et Dynamique Industrielle

TABLE DES MATIERES

Résumé exécutif.....	6
Executive summary	7
0. Introduction.....	9
1. Contexte et objectifs de l'étude	10
1.1. Contexte	10
1.1.1. Le besoin de flexibilité sur le système électrique	10
1.1.2. La solution de l'effacement de consommation.....	11
1.1.3. Les enjeux de l'effacement pour les entreprises	16
1.2. Objectifs, périmètre et méthodologie de l'étude	16
1.2.1. Objectifs de l'étude	16
1.2.2. Périmètre de l'étude	17
1.2.3. Grands principes méthodologiques	17
2. Etat des lieux des mécanismes de valorisation des effacements	18
2.1. Méthodologie	18
2.2. Les mécanismes de valorisation des effacements existants en France	19
2.2.1. Synthèse	19
2.2.2. Les mécanismes gérés par le gestionnaire du réseau de transport RTE, pour des besoins de flexibilité court terme	22
2.2.3. Le mécanisme de capacité	28
2.2.4. Le mécanisme NEBEF, valorisation des effacements sur le marché « énergie »	29
2.2.5. Autres mécanismes de valorisation : les offres des fournisseurs d'électricité	30
2.3. Benchmark des mécanismes de valorisation à l'international : Royaume-Uni, Japon et Etats-Unis (PJM et CAISO).....	31
2.3.1. Royaume Uni	31
2.3.2. Japon	40
2.3.3. Etats Unis – PJM & CAISO	44
2.4. Synthèse comparative des cadres de valorisation des effacements en France et à l'international.....	54
3. Méthodologie d'estimation des gisements.....	56
3.1. Sources d'information	56
3.2. Gisement technique	59
3.3. Gisement technico-économique	62
3.4. Estimation du potentiel à plus long terme (horizon 2035)	65
3.5. Limites de la méthodologie et domaine d'incertitudes	66

3.5.1.	Forces de la méthodologie	66
3.5.2.	Limites de la méthodologie	67
4.	Résultats de l'estimation des gisements techniques et technico-économiques - Analyse des gisements à court et moyen terme	69
4.1.	Détail des gisements et caractéristiques techniques des capacités d'effacement par secteur 69	
4.1.1.	Métallurgie	69
4.1.2.	Chimie.....	76
4.1.3.	Mécanique.....	82
4.1.4.	Matériaux non métalliques	87
4.1.5.	Plasturgie et caoutchouc	92
4.1.6.	Papier.....	97
4.1.7.	Agro-alimentaire	101
4.1.8.	Textile et industries diverses	105
4.1.9.	Le secteur du grand commerce alimentaire	109
4.1.10.	Les entrepôts frigorifiques	117
4.1.11.	Tertiaire de bureaux	122
4.1.12.	Le secteur du traitement et de la distribution de l'eau	127
4.1.13.	Le secteur des Data Centers	136
4.2.	Estimation des gisements techniques actuels à la maille nationale	142
4.2.1.	Synthèse	142
4.2.2.	Gisement technique industrie	145
4.2.3.	Gisement technique pour les secteurs tertiaires étudiés	147
4.3.	Estimation des gisements technico-économiques actuels à la maille nationale	150
4.3.1.	Synthèse : gisement technico-économique à la maille nationale.....	150
4.3.1.	Gisement technico-économique industrie.....	152
4.3.2.	Gisement technico-économique d'effacement dans les secteurs tertiaires étudiés..	156
4.4.	Evolution des gisements techniques et technico-économiques d'effacement à horizon 2035 157	
4.4.1.	Scénarios de référence	157
4.4.2.	Evolution des gisements techniques entre aujourd'hui et l'horizon 2035	158
4.4.3.	Présentation du cas évolution des équipements de pilotage type GTB vers des GTB « <i>smart grid ready</i> »	162
5.	Analyse des barrières au développement des effacements de consommation	163
5.1.	L'enjeu de fiabilité des capacités d'effacement	167
5.2.	Identification de pistes d'actions possibles pour la levée des barrières au développement 167	

ANNEXES.....	170
Table des figures.....	171
Lexique	174
Sigles et acronymes	177

Résumé exécutif

Le développement de l'effacement dans les secteurs industriels et tertiaires répond à un double enjeu :

- Pour le système électrique, il répond au besoin de développement de la flexibilité du système électrique et de la maîtrise de la pointe ;
- Pour les entreprises, il représente une opportunité de diversification des revenus et d'amélioration de leur performance énergétique.

Cette étude a ainsi pour objectif principal de caractériser et d'évaluer le potentiel d'effacement dans l'industrie et le tertiaire¹ en France métropolitaine en apportant des éléments à la fois qualitatifs (sur les usages effaçables, les contraintes techniques et économiques associées, ...) et quantitatifs. L'étude vise aussi à apporter un éclairage sur les différents mécanismes de valorisation des effacements existants et en développement en France et compare le contexte français au contexte de quelques pays étrangers.

Sur la base des travaux réalisés, le gisement technique² d'effacement par modulation de process (pour des effacements de courte durée³) est estimé entre 6,5 à 9,5 GW en cumulé pour l'industrie et les secteurs du tertiaire analysés. Il est principalement concentré sur l'industrie (~70% du gisement technique soit ~4,5 à 6,5 GW) et en particulier sur 4 secteurs (métallurgie, mécanique, chimie et industrie du papier) qui représentent à eux seuls les 3/4 du gisement technique industriel. Les secteurs tertiaires analysés représentant un potentiel global plus faible (~2 à 3 GW pour des courtes durées, soit ~30% du gisement technique), principalement concentré sur les bureaux et le grand commerce alimentaire. Sur un gisement technique industriel estimé à ~4,5 à 6,5 GW, 40% du gisement est constitué d'usages thermiques (fours principalement) et ~30% d'usages « moteurs » (broyage, laminage, air comprimé, ...). Les usages thermiques (froid, chauffage et climatisation) représentent quant à eux aussi ~40% du gisement technique des secteurs tertiaires étudiés. Si le gisement technique estimé est important (> 6 GW), le gisement technico-économique⁴ dépend quant à lui du niveau de rémunération accessible et est plus limité. Les capacités accessibles sont estimées entre ~1,5 et ~3,6 GW pour des rémunérations de ~30€/kW/an ou inférieur et entre ~2 et ~5 GW pour des rémunérations de ~60€/kW/an ou inférieure. Les capacités constituant le gisement le plus accessible économiquement sont principalement concentrées sur les secteurs de la métallurgie, la chimie et l'industrie du papier. A l'inverse, le gisement représenté par les secteurs « diffus » (tertiaires petits sites ou petite industrie) sont estimés comme majoritairement accessible pour des rémunérations élevées, supérieures à 60 €/kW/an.

Les principales barrières au développement de capacités additionnelles d'effacement sont aujourd'hui principalement économiques et organisationnelles⁵; les freins réglementaires et techniques résiduels sont aujourd'hui relativement limités. En effet, d'un point de vue réglementaire, de nombreux mécanismes intégrant les effacements de consommation ont été développés, améliorés et existent aujourd'hui en France pour gérer l'équilibre offre/demande du système électrique aux différents horizons de temps. L'analyse de benchmark réalisée sur le développement des effacements à l'international démontre par ailleurs un cadre réglementaire

¹ Seuls les secteurs bureaux, grands commerces alimentaires, entrepôts frigorifiques, secteur de l'eau (production et distribution d'eau potable, traitement des eaux usées) et data centers ont été privilégiés dans cette étude car présentant, a priori, un potentiel d'effacement par modulation de process plus fort.

² Estimation du maximum de capacité techniquement effaçable sur les différents procédés effaçables à un instant t dans chaque secteur hors contraintes économiques

³ 30 minutes consécutives (le gisement diminue avec la durée consécutives d'activation exigée)

⁴ Estimation de la puissance valorisable en fonction de la rémunération accordée à la puissance effaçable disponible et des contraintes de rentabilité économique

⁵ « Faible » valeur et rémunération accessible à l'heure actuelle aux effacements en regard des coûts et des contraintes (humains et financiers) de mise en œuvre (en particulier pour les sites « diffus » représentant des puissances unitaires faibles – tertiaire ou petite industrie)

français globalement bien avancé par rapport aux autres pays étudiés (Royaume-Uni, Japon et Etats Unis (Nord-Est et Californie)).

De premières pistes d'actions, principalement non techniques, pourraient permettre de diminuer ou lever certaines barrières au développement : intensifier la communication et la sensibilisation des consommateurs au sujet « effacement », favoriser, dans le secteur tertiaire en particulier, une démarche de mutualisation des investissements en incitant lors des rénovations ou nouvelles constructions à rendre les sites « *smart grid ready* », apporter plus de stabilité et de visibilité dans les règles / mécanismes de valorisation des effacements, ...

Executive summary

The development of demand response (DR) in the industrial and commercial⁶ sectors has a double aim:

- For the electrical system, it responds to the need of flexibility on the networks in order to control the peak loads and ensure balancing
- For the industrial and commercial companies, it represents a source of revenue diversification and an improvement of their energy efficiencies.

Thus, this study mainly aims at defining and estimating the potential for demand response in the industrial and commercial sectors in metropolitan France from both a qualitative (on the type of usages used for demand response, the technical and economic constraints...) and a quantitative point of view. The study also aims at introducing and presenting the range of existing mechanisms accessible to demand response in France and compare the French situation to the one in other foreign countries.

Based on the analyses performed, the technical potential⁷ (for short activation durations⁸) of demand response in France (including only demand response by decrease of electrical consumption) is estimated between 6.5 and 9.5 GW cumulating industry and commercial sector (for the commercial sectors analyzed). The major part comes from the industrial sector (~70% of the technical potential, or ~4.5 to 6.5 GW) and mainly 4 sectors (metal industry, manufacturing, chemicals and paper and board industry) representing ~3/4 of the industrial technical DR potential. The commercial sectors selected for this study represent a lower share of the DR technical potential (~30% of the technical potential, or ~2 to 3 GW for short durations) mainly on food retail and office buildings. Out of a ~4.5 to 6.5 GW industrial technical DR potential, ~40% of the potential is represented by thermal processes (ovens mainly) and 30% on motors processes (grinding, rolling process, compressed air...). Thermal processes (cold storage, heating, air conditioning) also represent ~40% of the commercial technical DR potential.

If the technical DR potential is significant (>6GW), the technico-economic DR potential⁹ depends on the achievable level of remuneration and this potential is thus more limited. For remuneration levels of ~30€/kW/year (or below), the economically accessible DR capacities are estimated to be between ~1.5 and ~3.6 GW and between ~2 and ~5 GW for remuneration levels of ~60€/kW/year (or below). The most economically accessible capacities are DR capacities from the metal industry, chemicals or paper and board industry. On the

⁶Analyzed sectors: Office sector, food retail, cold storage, water sector (drinking water production and distribution, waste water treatment) and data centers. These sectors have been selected as they represent the largest DR potential (for DR by decrease or stimulation of electrical consumption)

⁷Estimation of the maximum capacity that can technically be activated on the different processes that can participate to DR in each sector, regardless of profitability constraints.

⁸ 30 minutes of uninterrupted activation (the potential tends to decrease with the required uninterrupted activation duration)

⁹ Estimation of the capacity that can be activated with regards to the payment for the available capacity and the economic constraints (profitability of investments)

opposite, the least economically accessible capacities are the small sites capacities (small commercial sites, or small industries) as they need high remuneration levels (above 60€/kW/year) to make sense economically

Today, the major barriers to the development of additional DR capacities are mainly economical and organizational¹⁰; the regulatory and technical constraints that remain today being limited. Indeed, from a regulatory point of view, a lot of mechanisms are accessible and adapted to DR in France so that, today, DR can participate to the balancing of the electrical system at various time scales. The benchmark of DR development in selected foreign countries (United Kingdom, Japan, USA North-East and California) shows that the regulatory framework in France is among the most advanced.

In order to overcome some of the identified barriers to the development of additional DR capacities, some plans for action could be implemented : intensify communication, improve consumers awareness for demand response, encourage the mutualisation of investments, in the commercial sector mainly, to promote “smart grid ready” equipment during restructurings or new constructions, bring more stability and greater transparency on the mechanisms rules....

¹⁰ « Low » payments of the available capacity at the moment with regards to costs and constraints (workforce organization and financials) to implement DR (mainly in small sites where the unit capacities to be activated are small)

0. Introduction

Cette étude a pour objectif **d'évaluer finement le potentiel d'effacement dans l'industrie et le tertiaire en France métropolitaine, secteur par secteurs**. Les objectifs sont à la fois quantitatifs à travers l'estimation du potentiel d'effacement pour 9 secteurs industriels et 4 secteurs tertiaires, mais aussi qualitatifs via une meilleure description du sujet (process effaçables, conditions économiques...), et l'évaluation des freins et des leviers associés.

Cette étude a été menée sur la période d'Avril 2016 à Décembre 2016.

Pour réaliser cette étude, le groupement E-CUBE Strategy Consultants / CEREN mandaté par l'ADEME a mis en œuvre les moyens suivants

- Analyse de la littérature
- Réalisation d'un benchmark international
- Organisation d'entretiens approfondis avec plus de 40 acteurs clés de la filière française : consommateurs industriels & tertiaires - en direct et/ou via les associations/fédérations représentatives des différents secteurs -, opérateurs d'effacement, fournisseurs d'électricité, le gestionnaire de réseau de transport d'électricité
- Analyse des consommations électriques par secteur (en énergie et en puissance) par usage et modélisation du potentiel effaçable

Le rapport de cette étude est organisé comme suit :

- Le premier chapitre s'attache à éclairer le contexte lié au développement des effacements de consommation, apporte des précisions sur la définition prise ici d'effacement de consommation et décrit de manière synthétique les objectifs de l'étude, son périmètre et les grands principes méthodologiques.
- Le deuxième chapitre s'intéresse à décrire les mécanismes de valorisation des effacements existants ou à venir, sur le marché français dans un premier temps, puis réalise une comparaison du cadre réglementaire français avec celui de 3 pays étrangers le Japon, le Royaume-Uni et les Etats-Unis.
- Le troisième chapitre décrit de manière plus approfondie la méthodologie mise en œuvre pour estimer les résultats principaux de l'étude que sont les gisements techniques et technico-économiques d'effacement de *process*, sur les différents secteurs étudiés.
- Le quatrième chapitre présente les résultats qualitatifs et quantitatifs de l'étude, pour chaque secteur étudié d'une part, puis de manière agrégée d'autre part.
- Enfin, le cinquième chapitre s'intéresse à l'analyse des barrières au développement des effacements identifiées et discute in fine de pistes d'actions possibles pour lever ou atténuer ces barrières.

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. Contexte

1.1.1. Le besoin de flexibilité sur le système électrique

L'électricité étant difficilement stockable, le réseau électrique doit en permanence être équilibré entre offre (production d'électricité) et demande (consommation d'électricité).

Aujourd'hui, trois principales **sources de déséquilibres entre production et consommation** existent¹¹ :

- **« Côté demande » - la variation de la consommation** journalière, hebdomadaire et saisonnière : c'est la cause principale historique des variations sur le système électrique. En France, d'après RTE, en cas de vague de froid, 1 °C de moins représente une augmentation de la consommation de près de 2 400 MW.
- **« Côté offre » - la pénétration des énergies renouvelables (ENR) variables** : tout comme la variation de la consommation, si le niveau de production des ENR variables comme l'éolien ou le solaire peut aujourd'hui être anticipé de manière relativement satisfaisante, le caractère variable de ces énergies renouvelables en font néanmoins une source de déséquilibre sur le réseau électrique. L'augmentation de leur part dans le mix électrique devrait à moyen terme augmenter les besoins de flexibilité nécessaires pour la gestion de l'équilibre du réseau.
- **« Côté offre » - Les aléas fortuits des groupes de production (arrêts de fonctionnement non anticipés)** qui engendre des déséquilibres en termes de puissance de production, de fréquence et tension sur le réseau

Ces déséquilibres engendrent un **besoin de flexibilité** pour assurer la stabilité du système électrique et la sécurité d'approvisionnement. Les acteurs du système électrique, en premier lieu les acteurs responsables de l'équilibrage du réseau, c'est-à-dire les gestionnaires de réseau et les « responsables d'équilibre » (fournisseurs, producteurs, ...) cherchent donc des sources de flexibilité.

Pour répondre à ce besoin de flexibilité, plusieurs « outils » de rééquilibrage sont aujourd'hui à disposition de ces acteurs et notamment :

- les **centrales de production « dispatchables »** (c'est-à-dire dont le niveau de production est contrôlable – centrales thermiques ou certaines centrales hydrauliques) qui modulent leur production à la hausse ou à la baisse pour suivre la demande
- le **stockage**, historiquement développé via les stations de pompage hydrauliques mais dont la filière voit aujourd'hui l'émergence de nouvelles technologies (batteries, hydrogènes, air-comprimé, ...)
- ou encore les **interconnexions** avec les pays frontaliers (qui augmentent les capacités d'équilibrage).

L'effacement de consommation (et plus généralement la gestion de la demande – à la baisse (effacement) ou à la hausse (stimulation de la consommation) **offre une source de flexibilité supplémentaire pour assurer l'équilibre offre-demande du système électrique, en complément des autres formes de flexibilité mentionnées ci-dessus.**

¹¹ N'est pas mentionnée ici une autre source de déséquilibre correspondant à la défaillance des moyens de production d'électricité

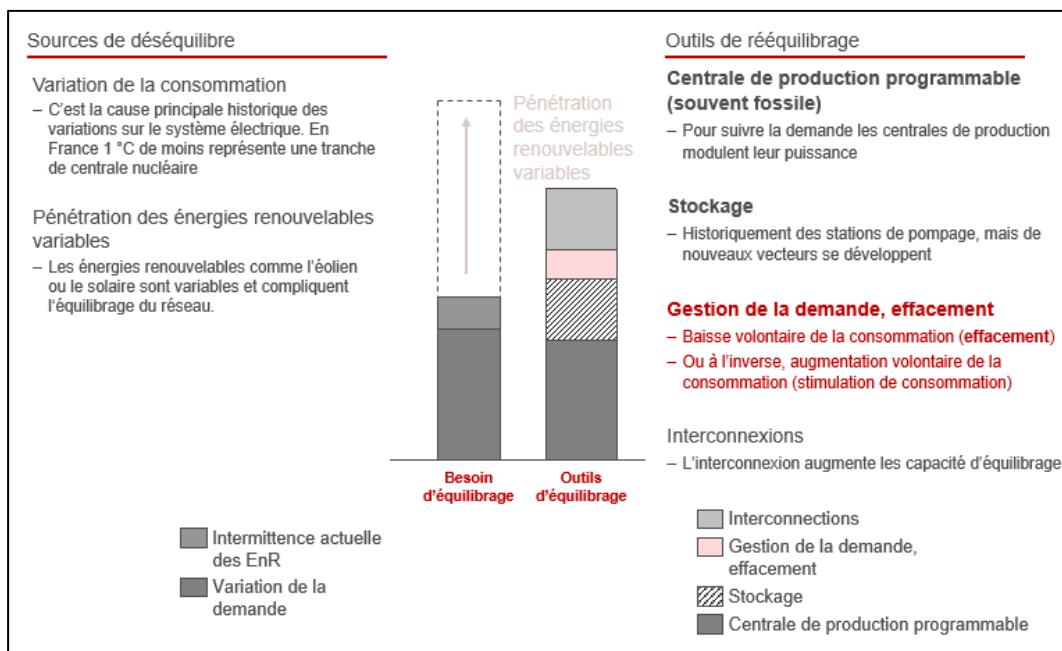


Figure 1 : Schéma illustratif des sources de déséquilibre et des outils d'équilibrage

1.1.2. La solution de l'effacement de consommation

1.1.2.1. Définition et typologie des effacements de consommation

Définition

Tel que défini par la Commission de Régulation de l'Energie (CRE) dans son document d'analyse de Juin 2013 sur les « éléments de méthodologie pour la valorisation des effacements de consommation d'électricité sur les marchés de l'énergie et sur le mécanisme d'ajustement », l'effacement de consommation consiste en « **une réduction temporaire du niveau de consommation d'un site vu du réseau, en réponse à une sollicitation externe** ». Cette réduction temporaire est réalisée par rapport à une consommation initialement prévue, et elle peut consister en un décalage dans le temps de la consommation initialement prévue.

Contrairement aux actions d'efficacité énergétique qui peuvent être mises en œuvre dans les entreprises tertiaires et industrielles, l'objectif premier de l'effacement n'est pas la réalisation d'économies d'énergies (diminution pérenne de la consommation électrique) mais bien la réduction temporaire de l'appel de puissance sur le réseau électrique pour des besoins d'équilibrage du réseau.

Typologie des effacements de consommation

Cette réduction temporaire du niveau de consommation d'un site vu du réseau peut être réalisée suite à une sollicitation d'un fournisseur d'électricité ou acteur autre que le fournisseur, par exemple par un agrégateur ou opérateur d'effacement, ou par le consommateur lui-même si celui-ci opère lui-même ses capacités d'effacement. Au sein de la filière effacement, on distingue ainsi souvent les **effacements qualifiés communément d'« explicites »** (c'est-à-dire en réponse à une demande explicite de réduction du niveau de consommation) sur sollicitation d'un des acteurs mentionnés ci-dessus, des **effacements « tarifaires »** (comme

les capacités d'effacement correspondant aux anciennes offres tarifaires EJP ou Tempo¹²) qualifiés communément d'effacements « implicites » car correspondant à une réduction du niveau de consommation d'un site en réponse à une augmentation temporaire du tarif de l'électricité facturé au consommateur.

Cette segmentation des capacités d'effacement liée au type de sollicitation n'est néanmoins pas liée à la nature de ces effacements. En revanche, au sein de la filière effacement, certains types d'effacement se révèlent de natures hétérogènes selon par exemple la technique/technologie mise en œuvre : effacement du réseau compensé par l'utilisation d'un outil de production locale (par exemple, démarrage d'un groupe électrogène) vs. modulation ou interruption de *process*. Ce dernier type d'effacement pouvant être lui-même de nature très différente en fonction des secteurs, le sous-jacent économique (effacement d'« opportunité » correspondant à l'utilisation de stocks intermédiaires vs. renoncement définitif à la production) ou encore la correspondance avec des modes de valorisation existants.

Ainsi, deux grandes catégories d'effacement peuvent être distinguées :

- **les effacements fondés sur l'autoproduction** : ce type d'effacement consiste à réduire la consommation du site vu du réseau en substituant le soutirage du réseau par un recours à un groupe de production sur le site de consommation (groupe électrogène, cogénération, ...). Il n'y a donc dans ce cas pas de réduction de la consommation des équipements ou *process* mais uniquement une réduction du soutirage du réseau.
- les effacements fondés sur la **modulation (voire l'interruption) des *process* consommateurs** d'électricité qui correspondent à une diminution réelle du soutirage (réseau ou autres moyens de production) du site en question à un instant donné

Les capacités d'effacement considérées dans le cadre de l'étude et pour lesquelles une évaluation du potentiel a été conduite sont limitées à la catégorie des effacements fondés sur la modulation. Le potentiel lié aux capacités fondées sur l'autoproduction n'a pas été considéré (cf chapitre « 1.2.2 Périmètre de l'étude »), l'effacement étant souvent de type carboné et n'entrant pas dans les objectifs de transition énergétique à long terme (bien que le service rendu au système électrique soit le même que dans le cadre d'effacements par modulation de *process*).

Au sein même des effacements fondés sur la modulation de *process*, la nature des capacités d'effacements peut être différente, en particulier en fonction des secteurs considérés (résidentiels, tertiaires ou industriels).

Le tableau ci-dessous donne une segmentation (simplifiée) des différents types d'effacement existants aujourd'hui.

¹² Tarifs à effacement mis en place par EDF avant l'ouverture des marchés (Tarifs EJP - Effacements Jours de Pointe pour les entreprises tertiaires, industrielles et clients résidentiels et Tarifs Tempo pour les clients résidentiels et petits professionnels)

		Rationnel économique	Exemples de secteurs	Processus clé
Effacement « Autoproduction »		Coût de production d'électricité avec un générateur diesel	Gén. diesel	Gén. diesel
Effacement via modulation ou interruption de process	« Diffus »	Economie de l'Energy Box contrôlant le chauffage électrique	Résidentiel	Chauffage électrique
		Part des coûts d'une GTB avancée et coûts d'étude	Tertiaire	Chauffage, ventilation, AC
	« Industriel »	Avec stocks intermédiaires Effacement d'opportunité (utilisation de stock existant, positionnement d'une maintenance)	Industrie du ciment	Broyage de granulats
			Sidérurgie	Four à arc
		« Purs » (renoncement à la production) Marge sur coût variable, c'est-à-dire la perte d'opportunité à ne pas produire	Industrie du papier	Broyage du bois
			Industrie chimique	Electrolyse

Figure 2 : Typologie simplifiée des effacements de consommation

Un effacement est caractérisé par un certain nombre de critères qui peuvent répondre ou non aux règles de participation à un mécanisme de valorisation. Parmi ces critères :

- le délai de mobilisation : délai de préavis nécessaire à activer l'effacement
- la durée d'utilisation ou durée consécutive d'activation qui correspond à la durée requise pendant laquelle l'effacement doit être activé
- la puissance effacée : puissance de soutirage baissée ou haussée
- la répétitivité de l'effacement dans le temps : périodicité maximale de l'effacement au cours d'une journée ou d'une semaine ou d'une année...

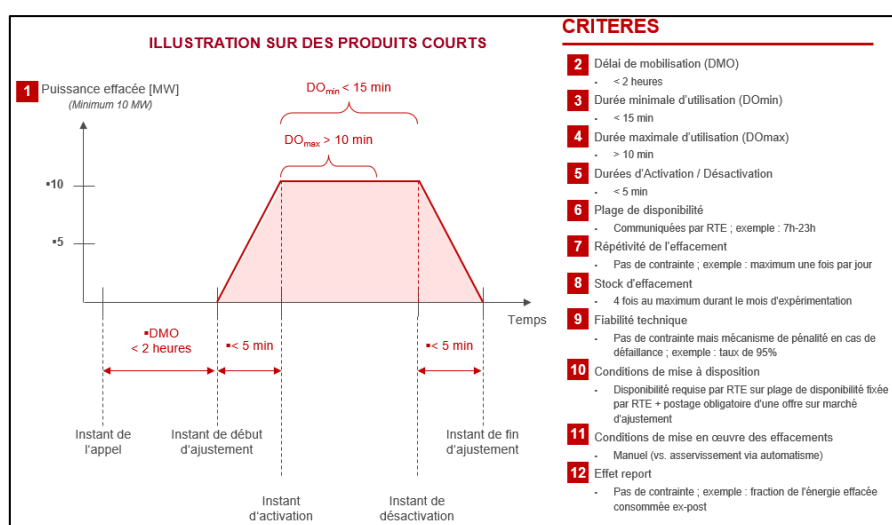


Figure 3 : Critères de caractérisation des effacements

1.1.2.2. Historique du développement des effacements de consommation en France et contexte actuel

La France a été pionnière dans le domaine de la gestion de la charge par le signal tarifaire du particulier aux grandes entreprises industrielles. Le tarif « **heures pleines/heures creuses** » (option tarifaire des tarifs réglementés bleus à destination des petits consommateurs) incitant notamment à l'utilisation des ballons d'eau chaude électrique la nuit pour lisser la courbe de charge nationale a été mis en place **dès 1965**. En **1982**, EDF a mis en place la **tarification EJP** (ou Effacements Jour de Pointe – pour l'ensemble des couleurs tarifaires ; en extinction depuis 1998 pour le tarif bleu) puis la **tarification TEMPO en 1996** pour les tarifs bleus (en extinction pour les professionnels en basse tension depuis 2004). Ces options tarifaires, compensant un prix élevé du kWh lors des pointes hivernales par un prix réduit le reste de l'année, avaient pour objectif l'incitation à l'effacement de consommation lors des pointes hivernales. Ces options ont été historiquement établies selon la logique économique des coûts de développement évités par l'effacement ou le report de consommation induit.

Après avoir représenté jusqu'à **~6 GW en 1997**, la puissance effaçable induite par les seuls tarifs EJP a connu une forte décroissance. Suite à l'ouverture des marchés depuis 1998, les tarifs EJP ne sont aujourd'hui plus proposés. La baisse historique des capacités d'effacement liées aux tarifs EJP a été observée essentiellement chez les clients industriels et principalement causée par¹³ :

- La fermeture de sites industriels importants
- La baisse du nombre de clients industriels au tarif EJP
- Une incitation à l'effacement devenue moins attractive au regard des coûts de maintenance/exploitation des groupes d'autoproduction en particulier – largement utilisés pour répondre aux sollicitations EJP¹⁴
- Mais aussi l'anticipation de l'interdiction réglementaire d'utilisation des groupes électrogènes

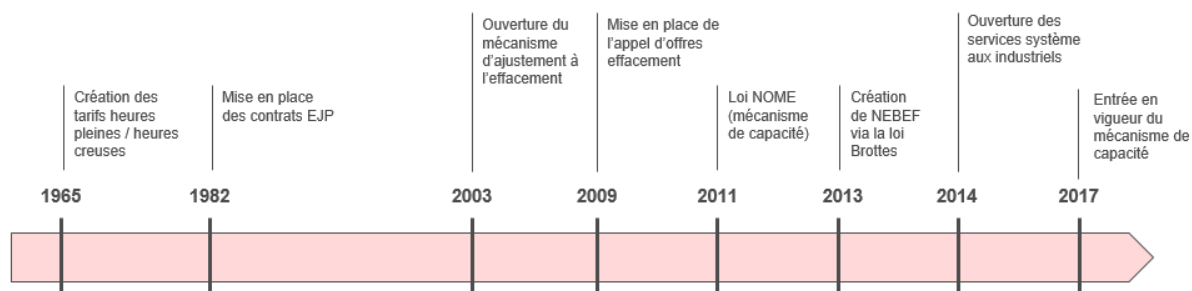
Cependant, suite à la décroissance observée des capacités d'effacement et la croissance néanmoins continue de la pointe électrique, les pouvoirs publics ont souhaité relancer, à partir de la fin de la décennie précédente, l'incitation au développement des capacités d'effacement notamment en engageant une réflexion sur la « Maîtrise de la pointe électrique », objet d'un rapport parlementaire réalisé par Messieurs Poignant & Sido¹⁵.

Depuis, de nombreuses évolutions réglementaires favorables au développement de capacités d'effacement ont été mises en œuvre (Voir 2. Etat des lieux des mécanismes de valorisation des effacements). Contrairement aux options tarifaires élaborées par EDF avant l'ouverture des marchés de l'électricité, les nouveaux mécanismes mis en place ont été élaborés post-ouverture des marchés et les évolutions réglementaires ont donc principalement consisté à permettre la participation explicite des capacités d'effacement (pouvant être opérées par des acteurs tiers) aux différents mécanismes de marché.

¹³ Source : EDF – “Groupe de travail sur la Maîtrise de la pointe – Atelier 6 – Les effacements développés par EDF – Janvier 2010”

¹⁴ En 2009, ~50% des clients industriels s'effaçant via les tarifs EJP utilisaient un groupe d'autoproduction – source EDF “Groupe de travail sur la Maîtrise de la pointe – Atelier 6 – Les effacements développés par EDF – Janvier 2010”

¹⁵ Rapport Poignant-Sido “Groupe de travail sur la Maîtrise de la pointe” – Avril 2010



Aujourd'hui, comme expliqué au paragraphe « 1.1.1. Les besoins de flexibilité du système électrique », le maintien d'une pointe hivernale importante et la croissance des énergies renouvelables variables permet d'anticiper un besoin de flexibilité croissant pour la gestion du système électrique et incite donc au développement des outils de gestion de la demande comme les effacements de consommation.

La nouvelle programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE¹⁶) fixe des objectifs ambitieux de développement des capacités d'effacement. En effet, tous types d'effacements confondus, la PPE fixe un objectif de développement de **5 GW en 2018** et **6 GW en 2023**, alors que le gestionnaire du réseau de transport RTE indiquait, dans son analyse du passage de l'hiver 2016/2017 (« *L'équilibre offre-demande d'électricité pour l'hiver 2016-2017* » - RTE – Novembre 2016) **~2,5 à 3 GW de capacité d'effacement disponible**, toutes capacités confondues (sur l'Appel d'Offres Effacement et les réserves -rapide, complémentaire et primaire-, via les clients aux tarifs EJP+Tempo et via les effacements directement contractualisés par les fournisseurs eux-mêmes) et **tous types d'effacements confondus**.

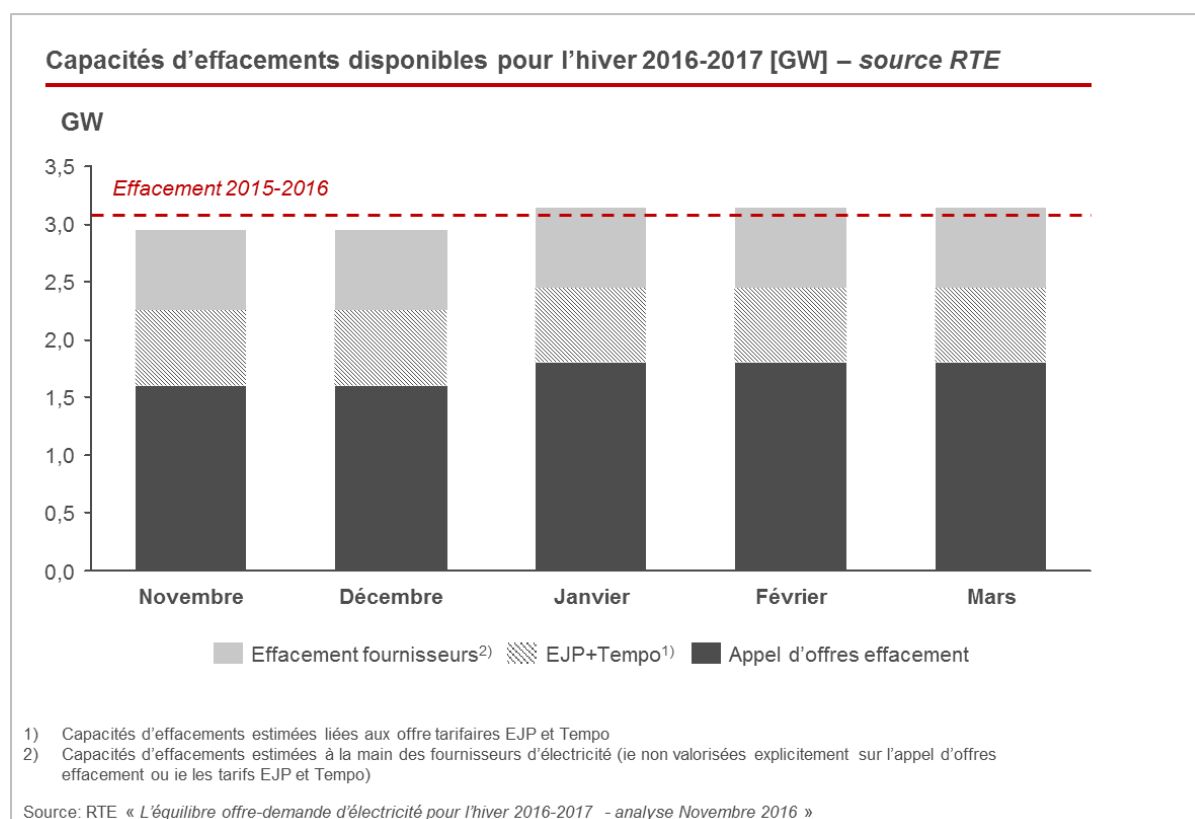


Figure 4: Effacements disponibles pour l'hiver 2016-2017 - source RTE

¹⁶ Décret n° 2016-1442 du 27 octobre 2016 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie

1.1.3. Les enjeux de l'effacement pour les entreprises

Historiquement, le prix de l'électricité pour les entreprises n'a cessé d'augmenter (malgré une accalmie récente liée à la conjoncture économique et la chute du prix des commodités). La suppression des tarifs réglementés de vente début janvier 2016 et la mise en place d'obligations de capacité envers les fournisseurs (retranscrite dans le prix au consommateur) intensifient pour les entreprises la question de la maîtrise du poste de coût énergie.

Pour une entreprise, l'amélioration de sa performance énergétique passe en par des actions d'efficacité énergétique, et une gestion efficace des flux énergétiques dont la mise en place d'une plus grande flexibilité des consommations électriques. La valorisation des capacités de l'effacement de consommation (que ce soit par modulation de *process* ou par l'utilisation de groupes d'autoproduction) peut par ailleurs représenter une opportunité d'améliorer sa compétitivité. En effet, la réflexion sur le sujet effacement nécessite dans un premier temps une démarche d'analyse de son profil de consommation (sa courbe de charge) permettant, de manière générale et au-delà de l'effacement, une meilleure optimisation de sa consommation dans le temps. Enfin, la capacité à valoriser sa flexibilité peut représenter une source de revenus complémentaire à court terme et aussi permettre de mieux bénéficier des évolutions de prix potentiels à moyen terme (et de la volatilité des prix de marchés) anticipées avec l'essor des énergies renouvelables.

Par ailleurs, aujourd'hui et suite à la sortie des tarifs régulés, l'effacement chez les acteurs industriels est parfois intégré à l'offre de fourniture d'électricité et fait l'objet d'une négociation avec les fournisseurs.

1.2. Objectifs, périmètre et méthodologie de l'étude

1.2.1. Objectifs de l'étude

Un objectif qualitatif et quantitatif

Cette étude a pour objectif général **d'évaluer le potentiel d'effacement dans l'industrie et le tertiaire en France métropolitaine** en apportant des éléments à la fois :

- qualitatifs (sur les usages effaçables, les contraintes techniques et économiques associées, les mécanismes de valorisation, ...)
- et quantitatifs, avec l'estimation chiffrée du gisement (technique et technico-économique) de capacités d'effacement dans l'industrie et le tertiaire, à la maille nationale. L'objectif de cette évaluation quantitative est bien d'évaluer un gisement potentiel global (notamment en fonction de la rémunération accordée) et non pas un gisement pour chacun des mécanismes de valorisation existants à l'heure actuelle avec les règles et niveaux de rémunération actuels.

Un des sous objectifs de l'étude est également d'apporter une **vision plus long-terme de ce gisement**, à un horizon 20 ans, en prenant notamment en compte l'impact de l'évolution des consommations électriques des différents secteurs étudiés.

Une vision sectorielle du gisement d'effacement

Par rapport à d'autre étude ou communications réalisées sur ce sujet, l'objectif de cette étude, via la méthodologie mise en place, consiste aussi à apporter une **vision sectorielle et technologique plus fine du sujet effacement avec une analyse qualitative et quantitative réalisée secteur par secteur** (sur la base de cas d'étude et d'entretiens auprès d'acteurs industriels – cf méthodologie).

1.2.2. Périmètre de l'étude

Une analyse restreinte aux effacements par modulation de *process* (ie excluant les capacités liées à l'autoproduction)

L'évaluation du gisement d'effacement a porté uniquement sur les **effacements par modulation de process**. Ainsi n'ont pas été considérées les capacités potentielles valorisables par auto-production (notamment avec des groupes électrogènes). Pour toute la suite de l'étude, sauf indication contraire, le terme effacement fait référence à de l'effacement par modulation de process.

Une évaluation du gisement couvrant l'industrie et les plus importants secteurs tertiaires

Tous les secteurs industriels (excepté le secteur de l'énergie comme le raffinage) ont été analysés dans le cadre de l'étude. Ainsi, l'évaluation du gisement a été réalisée sur la base de la décomposition sectorielle suivante des secteurs industriels :

- Métallurgie
- Matériaux non métalliques
- Verre
- Chimie
- Papier (papier et pâte à papier)
- Mécanique
- Agro-alimentaire
- Plasturgie et caoutchouc
- Industries diverses

Seuls certains secteurs tertiaires ont été analysés. L'évaluation du gisement tertiaire s'est restreinte aux secteurs les plus adaptés à la réalisation d'effacements de consommation par modulation :

- Bureaux
- Grands commerces alimentaires
- Entrepôts frigorifiques
- Secteur de l'eau (production et distribution d'eau potable et traitement des eaux usées)
- Data Center

1.2.3. Grands principes méthodologiques

Une étude en trois phases

L'étude a été réalisée en trois grandes phases distinctes :

- Une première phase d'**état des lieux du contexte de développement des effacements en France et à l'international** (sur trois géographies : Royaume-Uni, Japon et Etats Unis (Nord-Est et Californie)). Cette analyse comparée a permis de caractériser le contexte réglementaire et économique de développement des effacements en France par rapport à des géographies plus ou moins matures sur ce sujet.

- Une phase **d'étude d'environnement du développement actuel des effacements et des potentiels d'effacement par modulation de process** pour chacun des secteurs de l'industrie sélectionnés. Cette phase a été réalisée via des **études de cas auprès de grands acteurs de l'industrie et du tertiaire** et a permis une analyse plus fine du potentiel par secteur ainsi que l'établissement de « ratio types » de potentiels effaçable par secteur.
- Une phase **d'estimation des gisements** potentiels d'effacement par modulation de process à la maille nationale à l'heure actuelle (2016) et avec une vision plus long terme (horizon 2035). Ces estimations ont été réalisées sur un scénario de référence et ainsi que des analyses de sensibilité (scénarios bas et haut) réalisées sur la base de sensibilité sur différents paramètres techniques et économiques.

Cette étude a par ailleurs été enrichie par des échanges au cours de comités de pilotage réguliers réunissant à la fois des acteurs du secteur de l'électricité en France ainsi que des fédérations sectorielles d'entreprises représentant divers secteurs de l'industrie et du tertiaire. (cf liste des membres du COPIL et des acteurs interrogés).

Une évaluation du gisement technique et technico-économique

Sur la base des cas d'étude, l'estimation à la maille nationale a pour objectif de donner une vision du gisement potentiel d'effacement par modulation de process pour l'industrie et du tertiaire sélectionnés au périmètre France métropolitaine. Pour bien appréhender le potentiel d'effacement, il est nécessaire de séparer la recherche d'un gisement dit technique et sa faisabilité économique.

Les gisements estimés sont alors de deux types :

- **Le gisement technique** : ce gisement correspond à une estimation du maximum de capacité techniquement effaçable sur les différents process effaçables à un instant t dans chaque secteur hors contraintes économiques (sans considération de rentabilité d'investissements nécessaires ou autres coûts de mise en œuvre). Sont considérés ici uniquement les process jugés effaçables et non une interruption totale de la consommation d'un site industriel ou tertiaire (une telle considération viendrait à considérer la puissance totale appelée comme le gisement technique lui-même). Il s'agit d'un gisement maximum théorique, la prise en compte des coûts de mise en œuvre étant évidemment toujours intégrées par les acteurs lors de la mise en place de capacités d'effacement.
- **Le gisement technico-économique** : ce gisement correspond à une estimation de la puissance valorisable en fonction de la rémunération accordée pour une puissance effaçable disponible. Cela permet finalement de répondre à la question : « quel gisement disponible pour quel niveau de rémunération ? ».

2. Etat des lieux des mécanismes de valorisation des effacements

2.1. Méthodologie

L'état des lieux du développement des effacements porte, dans chacun des pays étudiés, sur le contexte de valorisation des effacements :

- L'organisation du système électrique national
- Une revue des mécanismes existants de valorisation des effacements en précisant les contraintes de participation, niveaux de rémunération
- Les capacités d'effacement valorisées sur chacun des mécanismes
- Les évolutions récentes et à venir de l'environnement réglementaire de valorisation des effacements

Cet état des lieux a tout d'abord été réalisé au périmètre France afin de caractériser les différents besoins du système électrique, les mécanismes existants permettant de valoriser des effacements, la capacité valorisée à l'heure actuelle en France. Cet état des lieux repose sur une analyse *ad hoc* de la bibliographie existante, l'expertise du cabinet E-CUBE Strategy Consultants sur l'effacement ainsi que des entretiens approfondis avec les différentes parties prenantes de l'effacement en France (et notamment le gestionnaire du réseau public de transport d'électricité RTE et les opérateurs d'effacement).

Parties prenantes du marché de l'effacement français



La majorité des opérateurs d'effacement, ainsi que RTE, ont été rencontrés afin d'échanger sur les freins et barrières au développement des effacements en France ainsi que l'analyse du gisement potentiel d'effacement

Acteurs des géographies du benchmark

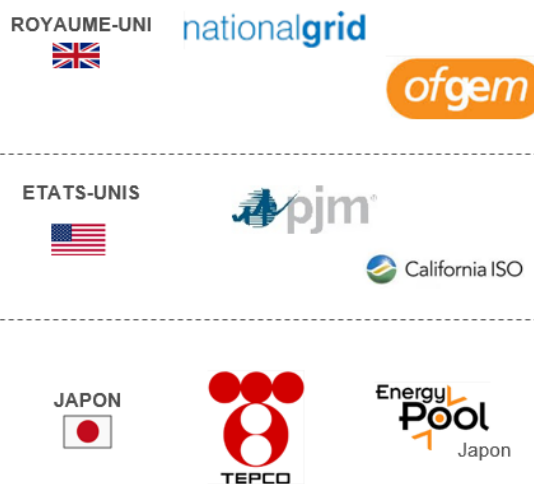


Figure 5 : Acteurs du secteur de l'effacement interrogés

Par ailleurs, les benchmarks sur le Royaume-Uni, le Japon et les Etats-Unis ont été réalisés de la même façon afin de permettre une analyse comparée des contextes de valorisation des effacements avec la France.

2.2. Les mécanismes de valorisation des effacements existants en France

2.2.1. Synthèse

Si les effacements de consommation ont été historiquement développés principalement au travers des tarifs à effacement mis en place par EDF avant l'ouverture des marchés (Tarifs EJP -Effacements Jours de Pointe) pour les entreprises tertiaires, industrielles et clients résidentiels et Tarifs Tempo pour les clients résidentiels et petits professionnels), la situation a évolué ces dernières années et les capacités d'effacement peuvent désormais être valorisées en France au travers de nombreux autres mécanismes ouverts à tous les opérateurs d'effacement et consommateurs.

En effet, de nombreux mécanismes existent aujourd'hui pour gérer l'équilibre offre/demande (O/D) du système électrique aux différents horizons de temps (voir 1.1.1 Le besoin de flexibilité sur le système électrique), des réserves primaire et secondaire gérant les déséquilibres très court terme (quelques secondes) du niveau de fréquence du réseau, jusqu'aux mécanismes permettant l'organisation de l'équilibre O/D à plus long-terme comme les marchés de l'énergie (spot (J-1) et à terme) et le mécanisme de capacité (anticipation à plusieurs années des capacités disponibles).

Les évolutions de la réglementation du marché électrique ont permis ces dernières années une ouverture progressive de ces mécanismes/marchés aux effacements de consommation et/ou une mise en place de mécanismes dédiés aux effacements. Ces évolutions font d'ailleurs aujourd'hui de la France un des marchés les plus matures en termes de développement des effacements de consommation et de cadre réglementaire d'intégration de ces effacements au marché électrique (voir 2.3 Benchmark des mécanismes de valorisation à l'international : Royaume-Uni, Japon et Etats-Unis (PJM et CAISO)). On notera en particulier les évolutions récentes suivantes :

- **AO Effacement** : Afin de soutenir le développement de capacités d'effacement sur le territoire et de constituer des réserves additionnelles aux réserves rapides et complémentaires, RTE organise annuellement depuis 2011 un appel d'offres dédié aux capacités d'effacement dont l'objectif est la contractualisation de capacités d'effacement disponibles tout au long de l'année. Ces capacités contractualisées doivent être disponibles et déposer des offres d'ajustement tout au long de l'année sur le mécanisme d'ajustement (ou valoriser leur énergie sur le mécanisme NEBEF lorsqu'appelées). Par ailleurs, la Loi de Transition Énergétique (LTECV : LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte) a confirmé la pérennité d'un tel mécanisme en cas de risque de non atteinte des objectifs de la PPE ou potentiellement en cas de besoin identifié par RTE.
- **Mécanisme de Capacité** : En vue d'assurer la sécurité d'approvisionnement du système électrique, RTE et les pouvoirs publics ont mis en place un mécanisme rémunérant les capacités de production via un marché d'échanges de « garanties de capacités » entre des acteurs obligés et des détenteurs de capacités (producteurs, effacement). Les effacements peuvent être valorisés en tant que capacités explicites sur ce marché ou de façon implicite en diminuant les volumes d'obligation des fournisseurs. Ce mécanisme a été lancé pour l'année de livraison 2017, avec une première enchère de capacité en Décembre 2016.
- **Ouverture aux réserves (RR RC) et plus récemment à la R1¹⁷** : Depuis janvier 2014, les sites de soutirage raccordés directement au réseau de transport et, depuis juillet 2016, les sites de soutirage raccordés au réseau de distribution peuvent participer aux services système et plus particulièrement à la constitution de la réserve primaire. Les services système sont des services gérés par RTE dans le but de maintenir une fréquence et une tension stable sur le système électrique.
- **NEBEF** : Avant la mise en place du mécanisme NEBEF, il n'existait pas de possibilité de valorisation « explicite » de l'énergie issue d'effacements sur les marchés de l'électricité (les effacements ne pouvaient être valorisés que de façon « implicite » dans le cadre d'une optimisation privée au sein d'un portefeuille de fourniture). C'est cette possibilité nouvelle qu'offre le mécanisme NEBEF mis en place par RTE depuis 2015. Ce mécanisme consiste notamment à organiser les flux financiers entre les différents acteurs afin de permettre la valorisation d'effacements sur le marché énergie, pour un site de consommation donné (ou une agrégation de sites de consommation), par un opérateur d'effacement distinct du (ou des) fournisseurs de ce (ces) site(s).

La figure ci-dessous présente une synthèse des différents mécanismes de valorisation existants, leur principe, une estimation des capacités d'effacement (industriel, tertiaire et résidentiel) valorisées sur chacun :

¹⁷ RR et RC : Réserve Rapide et Réserve Complémentaire, activables manuellement par appel aux producteurs ou consommateurs participants. R1 : Réserve primaire, mécanisme d'équilibrage du système électrique activés automatiquement avec des délais courts (en quelques secondes).

Mécanismes de valorisation		Description / Fonctionnement / Utilité	Date de mise en place ¹⁾	Effacements valorisés
Mécanismes directement gérés par RTE	Réglage fréquence (Réserves primaires et secondaires R1 et R2) ²⁾	Asservissement des moyens de production (et participation désormais possible pour l'effacement pour le réglage en fréquence) pour gérer les déséquilibres très-court-terme du réseau	Juillet 2014	70 MW
	Mécanisme d'ajustement	Pour gérer les déséquilibres court-terme (en intraday) du réseau, RTE fait appel tous les jours à des sources de flexibilité (capacités de production et d'effacement) qui sont rémunérées (en €/MWh) si leurs offres sont acceptées par RTE	2003	12 GWh en 2016
	Réserves rapides (RR) ³⁾	Pour s'assurer de la disponibilité de capacités flexibles en cas de déséquilibre importants sur le réseau, RTE contractualise des capacités de production et d'effacement pour une ou plusieurs années via un mécanisme d'appel d'offre	2003	500 MW en 2017
	Réserves complémentaires (RC) ³⁾	La production et les effacements sont en concurrence sur ces réserves		~0 MW
	Appels d'offre Effacement	En plus des réserves rapides et complémentaires, RTE contractualise des capacités d'effacement uniquement chaque année. Il n'y a ici pas concurrence avec la production	2011	Entre 750 et 1400 MW sur l'année 2017
	Interruptibilité	Ce mécanisme rémunère les capacités d'effacement (> 40 MW) de gros industriels dont les process de consommation peuvent être asservis et donc activés en 5 secondes max	2012	1,5GW en 2017
(NEBEF) Activation d'effacement sur le marché énergie		Ce mécanisme permet aux opérateurs d'effacement de pouvoir valoriser leurs effacements sur le marché de gros (via la ventes de blocs d'effacement - NEBEF) et non plus uniquement sur le marché d'ajustement géré par RTE	2013	10,5 GWh en 2016
Mécanisme de capacité		Mécanisme qui rémunère la disponibilité des capacités d'effacement et de production lors des périodes de pointe (hiver)	2017 (certification dès 2015)	1,7 GW certifiés à date

Source: RTE, E-CUBE Strategy Consultants

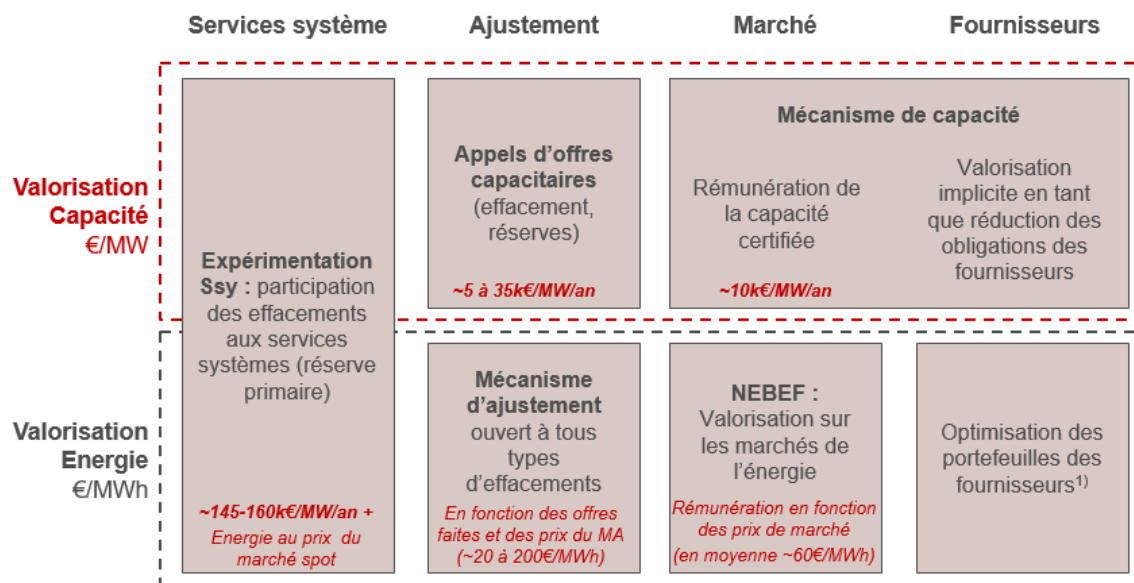
1) Ou date d'ouverture à l'effacement

2) R1 = FCR (Frequency Control Reserve) ; R2 = aFRR (automatic Frequency Restoration Reserve)

3) RR = mFRR (manual Frequency Restoration Reserve) ; RC + autres réserves tertiaires = RR (Replacement Reserves)

Figure 6 : Présentation des mécanismes de valorisation de l'effacement en France

Les principes de rémunération de ces mécanismes sont différents : certains mécanismes offrent une prime fixe au kW disponible et selon la disponibilité de la capacité, d'autres ne rémunèrent que l'énergie réellement effacée, d'autres cumulent ces deux types de rémunération. Le tableau ci-dessous représente les types de rémunérations principales de ces différents mécanismes et l'ordre de grandeur actuel du niveau de rémunération. **Par ailleurs, certains mécanismes sont cumulables** : il est possible de capter des revenus de la réserve tertiaire et du mécanisme d'ajustement (celui-ci recevant des offres – en énergie donc - des capacités contractualisées dans la réserve tertiaire), il sera possible de cumuler le mécanisme de capacité avec des mécanismes d'équilibrage et NEBEF, et il est possible désormais possible depuis 2015 de participer à la fois à l'interruptibilité et à d'autres mécanismes à appels d'offres RTE.



1) En contractualisant des capacités d'effacement avec leurs clients afin d'optimiser la demande sur leur périmètre d'équilibre

Figure 7 : Valorisation des effacements en fonction des mécanismes

Aujourd'hui, la valorisation des effacements est principalement capacitaire. En effet, les activations d'effacement sont aujourd'hui relativement peu fréquentes et l'effacement de consommation est rémunéré pour sa disponibilité principalement (rémunération principalement en revenu fixe en €/kW disponible). Les décisions d'investissement de consommateurs se font aujourd'hui davantage sur la base d'estimations de rémunération capacitaire que sur des estimations de rémunération énergie, lors des activations car les rémunérations énergie sont relativement faibles et les activations peu fréquentes.

2.2.2. Les mécanismes gérés par le gestionnaire du réseau de transport RTE, pour des besoins de flexibilité court terme

2.2.2.1. Valorisation des effacements dans le cadre des services système fréquence (réserves primaire et secondaire)

Les services système fréquence regroupent les réglages primaire et secondaire de la fréquence. Le réglage primaire en fréquence vise à assurer de façon automatique le rétablissement, en cas d'écart, en 30s de l'équilibre production-consommation en maintenant la fréquence dans des limites acceptables. A la suite du réglage primaire, le réglage secondaire de la fréquence permet de rétablir la fréquence à sa valeur de consigne.

La participation à ces services est assurée par les capacités constituant les réserves primaire et secondaire. Ces réserves sont assurées par des acteurs (acteurs obligés pour la réserve secondaire) qui augmentent (respectivement baissent) leur production automatiquement en cas de rupture d'équilibre.

RTE a mis en place début 2017 un mécanisme de constitution de la réserve primaire par appel d'offres hebdomadaires ou journaliers afin de participer au mécanisme multinational avec les gestionnaires des réseaux de transport voisins (Allemagne, Autriche, Pays-Bas et Suisse) qui contractualisent déjà leur réserve primaire via ce système d'appel d'offres transfrontalier. L'objectif de cette évolution est à la fois d'accéder aux interconnexions et d'améliorer les modalités d'accès au marché des sites de soutirage et des nouveaux entrants. Auparavant, la réserve primaire était constituée, de même que la réserve secondaire, par les capacités de producteurs obligés. Aujourd'hui, les sites de soutirage n'ont plus l'obligation de valoriser leur réserve auprès

d'un producteur obligé dans la nouvelle configuration proposée par RTE mais peuvent la valoriser directement auprès des gestionnaires de réseau. Cela facilite la participation de l'effacement à la constitution de la réserve primaire mais peut également renforcer la concurrence sur le marché de la réserve primaire.

La réserve secondaire, elle est dimensionnée au niveau national, et tous les producteurs de la zone France possédant des groupes de production de plus de 120 MW ont l'obligation d'affecter une partie de leur puissance à la réserve secondaire. Cette dernière est comprise entre 500 MW et 1000 MW, selon la plage horaire et la période de l'année.

La rémunération des producteurs obligés, pour les capacités constituant la réserve secondaire, est régulée par RTE qui intègre : un prix forfaitaire de la capacité pour chaque pas demi-horaire sur lequel la capacité est disponible (en 2016, 157 k€/MW par an pour une capacité disponible toute l'année) et un prix énergie correspondant au prix constaté de l'enchère EPEX SPOT (pour une livraison d'1 MWh en France) de l'heure contenant le pas demi-horaire concerné. Concernant la réserve primaire, la rémunération est, depuis le début de l'année 2017, le résultat de l'appel d'offres hebdomadaire transfrontalier.

Avant juillet 2014, seuls les producteurs (sites d'injection) pouvaient et avaient une obligation de participer aux réserves primaire et secondaire mais les consommateurs n'étaient pas autorisés à participer. Cette restriction était notamment due aux contraintes techniques de participation aux services système (délai d'activation très court avec asservissement automatique à la variation de fréquence) mais aussi au fait que la recherche d'une optimisation économique de la constitution de ces réserves ainsi que le sujet effacement n'étaient pas aussi importants qu'aujourd'hui.

Depuis juillet 2014, les consommateurs raccordés au réseau de transport peuvent participer aux réserves primaire et secondaire afin de fournir des services système : via l'appel d'offres transfrontalier pour la réserve primaire et, pour la réserve secondaire, aux acteurs obligés. D'autre part, RTE propose depuis janvier 2016 aux consommateurs raccordés au réseau de distribution de valoriser leurs capacités d'effacement sur la réserve primaire.

Ces capacités d'effacement par interruption de process susceptibles de participer au réglage de la fréquence du réseau concernent les process qui présentent une forme d'inertie liée à la température ou à une capacité de stockage comme les procédés utilisateurs de chaleur, certains usages du froid comme les chambres froides, les stockages de froid, les pompes). Les secteurs industriels potentiels pour ce format d'effacement peuvent être la sidérurgie, la métallurgie, secteurs qui ont recours à des process adaptés, intégrant des fours ou des lignes d'électrolyse acceptant des plages de variation des conditions de consigne. Dans le tertiaire, le secteur du traitement et de la distribution d'eau pourrait par exemple valoriser des capacités d'effacement sur des usages de pompes sur la réserve primaire (c'est le cas par exemple de l'entreprise *United Utilities*, la plus grande société d'exploitation de réseaux de distribution et traitement d'eau au Royaume-Uni, qui valorise aujourd'hui des capacités d'effacement sur le mécanisme de gestion de la réserve primaire (*Dynamic Frequency Response*) via l'agrégateur *Open Energi*).

A l'heure actuelle en 2017, 70MW de capacités de consommation sont valorisées sur la réserve primaire¹⁸, les clients valorisant de l'effacement sur ce mécanisme étant des industriels utilisant des procédés d'électrolyse réagissant bien à la contrainte de programmation symétrique (i.e. à la hausse et à la baisse) de la réserve primaire.

Concernant les évolutions réglementaires en cours sur les services système, RTE proposera une participation des capacités dissymétriques aux réserves primaire et secondaire (2017) : **les industriels capables de s'effacer mais pas d'accroître leur consommation seront en mesure de participer aux réserves primaire et secondaire.** La participation dissymétrique devrait permettre d'élargir le réservoir de flexibilités de consommation capables de

¹⁸ Smart Energy Demand Coalition, *Mapping Demand Response in Europe Today*, 2015

fournir des services système, sous réserve que les offres de flexibilité uniquement à la baisse proposées par les producteurs soient suffisantes.

2.2.2.2. Valorisation des effacements dans le cadre de la réserve tertiaire en capacité et en énergie effacée

2.2.2.3. Les réserves rapide et complémentaire

Les critères d'ENTSO-E (le réseau européen des gestionnaires de réseaux de transport) préconisent que les gestionnaires de réseaux de transport (GRT) doivent disposer, à chaque instant, d'une puissance activable en moins de 15 minutes permettant de faire face à la perte du plus gros groupe de production raccordé au réseau du GRT (1500 MW pour la France). Cette « marge 15 min » est constituée de la réserve secondaire et de la réserve tertiaire activable en moins de 15 minutes.

Pour ce faire, RTE contractualise, via des appels d'offres, une réserve de capacités dite « rapide » de 1000 MW activables en moins de 13 minutes. D'autre part, afin de reconstituer la réserve secondaire (lorsque celle-ci a été consommée), RTE dispose d'une réserve dite « complémentaire » de 500 MW activable en moins de 30 minutes. Ces réserves sont utilisées pour compléter la réserve secondaire si celle-ci est épuisée ou n'est pas suffisante pour faire face à un déséquilibre, mais aussi pour reconstituer les réserves primaire et secondaire ou anticiper un déséquilibre à venir.

La contractualisation de ces réserves rapide et complémentaire consiste à payer une prime fixe aux acteurs retenus lors de l'appel d'offres. En contrepartie, ces acteurs s'engagent à déposer, pour tous les jours sur lesquels leurs offres ont été sélectionnées, des offres sur le mécanisme d'ajustement d'un niveau de puissance correspondant à la puissance contractualisée lors des appels d'offres réserves rapide et complémentaire, pour garantir à RTE une disponibilité à chaque instant de ces capacités et respecter les préconisations de l'ENTSO-E. Contrairement aux réserves primaire et secondaire dont l'activation est automatique, l'activation des réserves rapide et complémentaire se fait « manuellement », c'est-à-dire par l'industriel lui-même sur sollicitation de RTE.

Les appels d'offres liés à ces réserves rapides et complémentaires, réalisés annuellement, sont aujourd'hui ouverts aux capacités de production comme aux capacités d'effacement de consommation. Aujourd'hui, les effacements ne participent qu'à la réserve rapide et les volumes de capacités d'effacement participant à cette réserve sont au maximum d'environ 500 MW (stable depuis 2014) (source RTE) sur un total de 1000 MW (soit ~50% des capacités).

La participation à ces appels d'offre est néanmoins soumise à un seuil minimal de capacité de 10 MW pour la réserve rapide et pour la réserve complémentaire (avec néanmoins la possibilité d'agréger les capacités). Les contraintes d'activation et de disponibilité sont les suivantes :

Mécanisme	Délai de mobilisation	Durée d'activation consécutive	Périodicité	Disponibilité
Réserve rapide	13 min	30 min	2 fois/jour max	Tous les jours de la période considérée (Périodes hebdomadaires divisées en « jours ouvrés » et « WE + jours fériés »)
Réserve complémentaire	30 min	30 min	2 fois/jour max	Tous les jours de la période considérée

Pour l'année 2017, le prix de la réserve rapide pour une capacité 100% disponible est de 24,3 k€/MW/an (contre 28,6 en 2016) et le prix de la réserve complémentaire est de 16,4 k€/MW/an (contre 18,2 en 2016). La rémunération dépend, chaque année, du résultat du processus compétitif d'appel d'offres organisé par RTE. Le paiement (en prime fixe) des offres retenues se fait au critère prix de la dernière offre retenue (critère marginal). Les capacités participant à ces réserves rapide et complémentaire sont soumises à une obligation d'observabilité et à un système de pénalités incitant à maximiser la disponibilité des capacités.

2.2.2.4. Le mécanisme d'ajustement

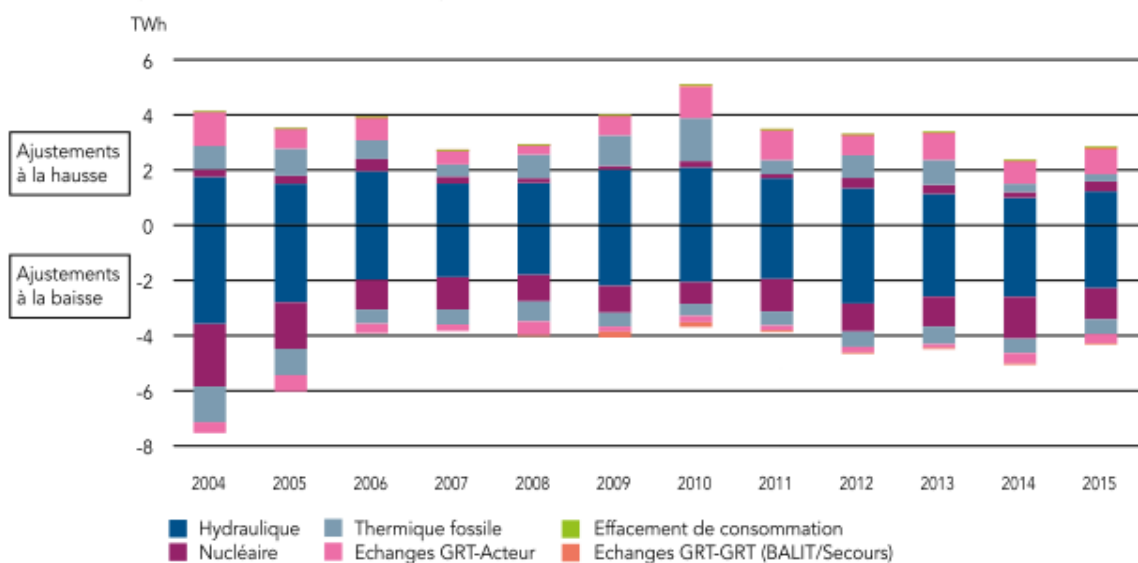
Le mécanisme d'ajustement consiste à rémunérer la modification, par le gestionnaire du réseau de transport, des programmes d'injection ou de soutirage des acteurs pour corriger les déséquilibres du système et s'appuie sur le réservoir d'offres qu'est la réserve tertiaire. Tous les producteurs raccordés au réseau de transport ont l'obligation d'offrir leur puissance disponible à RTE. En outre, les consommateurs ayant des capacités d'effacement et les acteurs étrangers via les interconnexions ont la possibilité de faire des offres, de manière volontaire, sur le mécanisme d'ajustement français.

Son principe est le suivant :

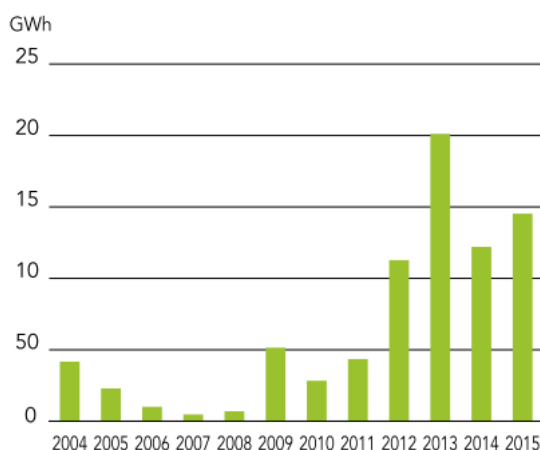
- Les acteurs opérant des capacités de production et/ou d'effacement soumettent tous les jours, leurs offres de flexibilité pour le lendemain (déclaration des offres à différents guichets en J-1), dépendant notamment de leur programme de production pour le lendemain et de la capacité disponible restante (ou capacité d'effacement prévue)
- L'entité réalisant l'offre fixe elle-même tous les paramètres de l'offre : le prix (€/MWh), la capacité disponible (puissance), la période d'activation (plages de disponibilité) et les conditions techniques d'activation (délai de mobilisation (préavis), durée d'activation/désactivation, durée minimale et maximale d'utilisation, ...)
- Une offre d'ajustement peut être une offre à la hausse (augmentation de production ou effacement de consommation) ou à la baisse (diminution de production ou augmentation de la consommation). **Le seuil minimal d'une offre d'ajustement est normalement de 10 MW (avec, depuis avril 2015, une tolérance d'offres comprises entre 1 et 10 MW dans une limite de 10 offres)** mais avec possibilité d'agrégation de plusieurs sites de production ou de consommation.
- RTE agrège l'ensemble de ces offres et, le jour J, en cas de besoin, fait appel à ces offres en fonction de leur présence économique et de leur condition d'utilisation en tenant compte des conditions d'exploitation du système.

La rémunération des capacités d'effacement sur le mécanisme d'ajustement est donc réalisée uniquement lors de l'activation des effacements (en fonction des MWh effacés), lorsque les offres sont appelées par RTE pour corriger un déséquilibre du système, et à un niveau de prix respectant les conditions demandées par l'offreur de capacité. **Elles peuvent cependant être également rémunérées pour leur disponibilité si elles sont par ailleurs retenues dans les réserves contractualisées par RTE.** La production d'électricité et les effacements sont en concurrence sur ce mécanisme. En pratique, si des capacités d'effacement sont contractualisées via les réserves rapide et complémentaire (en concurrence avec la production sur ces réserves) et l'appel d'offres dédié aux capacités d'effacement pour garantir la disponibilité de capacités flexibles participant au mécanisme d'ajustement, **ces capacités d'effacement sont aujourd'hui très peu activées car elles offrent leurs capacités à des prix très élevés en moyenne.** En effet, les volumes d'effacement activés sur le mécanisme d'ajustement représentent historiquement moins de 1% des volumes ajustés à la hausse, comme le montrent les chiffres historiques de RTE (graphiques ci-après).

Volumes ajustés sur le mécanisme d'ajustement



Volumes des effacements sur le mécanisme d'ajustement



La rémunération des offres d'ajustement est variable chaque jour et heure de l'année (en fonction des besoins de RTE qui sélectionne les capacités à activer et les rémunère au prix de l'offre – pay as bid -) et varie entre ~20 et ~400-500 €/MWh, les effacements contractualisés dépassant rarement les 200€/MWh (les modalités des appels d'offres limitant ce montant). La rémunération moyenne des effacements RTE activés sur le mécanisme d'ajustement est *a priori* plus élevée (du fait de leurs prix d'offres élevés – source RTE) mais le chiffre n'est pas public.

2.2.2.5. L'appel d'offres effacement

Depuis 2011 et suite au vote de la loi NOME (Nouvelle Organisation des Marché de l'Electricité), RTE organise annuellement un appel d'offres dédié aux capacités d'effacement dont l'objectif est la contractualisation de capacités d'effacement disponibles sur le mécanisme d'ajustement les jours de tension sur l'équilibre offre-demande. Ces capacités contractualisées doivent, comme les capacités contractualisées dans le cadre des réserves rapide et complémentaire, être disponibles et déposer des offres d'ajustement certains jours de l'année (signalés la veille pour le lendemain) sur le mécanisme d'ajustement. Le but de ce mécanisme est, d'une part de

garantir la disponibilité de moyens flexibles pour l'équilibrage les jours de forte tension (pour augmenter les sources de flexibilités exploitables par RTE), d'autre part et surtout, de soutenir le développement de capacités d'effacement sur le territoire.

Les volumes contractualisés via ce mécanisme ont augmenté annuellement depuis sa mise en œuvre en 2011 et varient entre ~1500 et ~2000 MW pour l'effacement en pic selon les années. En 2015, les 1,8 GW d'effacement en pic sont retenus sur l'AO effacement. Pour l'année 2016, RTE communique sur la contractualisation de 2,1 GW d'effacement en pic : 1,9 GW d'effacement « industriel » en pic (pour les capacités connectées au réseau moyenne et haute tension) et de 200 MW d'effacement diffus en pic (pour les capacités connectées au réseau basse tension). Cette distinction en deux catégories avec des appels d'offres différenciés par catégorie a été introduite en 2016, et devrait perdurer dans les futurs appels d'offres.

Ces capacités « réservées » reçoivent ainsi une rémunération annuelle garantie en échange d'un engagement à être disponibles durant certaines périodes pré-signalées par RTE. Au total, la rémunération perçue par les capacités d'effacement ayant été sélectionnées suite à l'appel d'offres représente près de 30 M€ (source RTE). Le paiement (en prime fixe) des offres retenues se fait au critère prix de la dernière offre retenue (critère marginal). **Ainsi, l'ordre de grandeur de la rémunération fixe accessible pour les capacités valorisées sur ce mécanisme est d'environ 15 k€/MW/an.** En contrepartie, ces capacités d'effacement doivent répondre à un cahier des charges et des contraintes d'activation qui sont les suivantes : un délai d'activation minimum de 2 h, une heure de fonctionnement consécutif maximum, une activation 1 à 2 fois par jour (au choix – à déterminer lors de la réponse à l'appel d'offres), un nombre d'appels annuels maximum de 15 à 40 fois par an (au choix – à déterminer lors de la réponse à l'appel d'offres, et dépendant de la durée d'engagement en mois, et du caractère continu ou non de la période d'engagement).

Moyens à disposition de RTE	Puissance totale concernée	Sens	Délai d'action	Acteurs concernés	Participation	Niveau de rémunération ⁴⁾	
						Capacité	Energie
1 Réserve primaire (automatique)	~ 700 MW	↕	< 30 s	L'ensemble des producteurs français ¹⁾ et consommateurs	Historiquement obligatoire Passage à un système de marché en 2017 (pour la réserve primaire)	Historiquement fixée par RTE (~145 €/kW/an)	Energie effacée au prix spot EPEX
2 Réserve secondaire (automatique)	500 ~ 1000 MW	↕	< 15 min	L'ensemble des producteurs français ²⁾			Passage à un système de marché en 2017 (pour la réserve primaire)
3 Réserve tertiaire (manuelle)	R. Rapide 1000MW	↑	<13 min	Producteurs et Consommateurs français	Volontariat pour la participation aux Appel d'offres – disponibilité sur le MA obligatoire pour les capacités retenues ³⁾	~5 à 35 €/kW/an	+ revenus éventuels énergie (MA ou NEBEF)
	R. Complémentaire 500 MW	↑	<30 min				
	AO Effacement ~ 750-1400 MW (2017)	↑	< 2 h	Consommateurs français			
Mécanisme d'ajustement (MA)	AUTRES Variables	↕	Variable	Producteurs français	Obligatoire		A l'énergie vendue, au prix de l'offre sur le MA
				Consommateurs Acteurs étrangers GRT anglais	Volontaire		

- 1) Tous les nouveaux groupes de production de plus de 40 MW et tous les anciens groupes de production de plus de 120 MW connectés au réseau de transport français ont l'obligation de réserver une partie de leur puissance pour la réserve primaire.
2) Tous les producteurs de la zone France possédant des groupes de production de plus de 120 MW ont l'obligation d'affecter une partie de leur puissance à la réserve secondaire.
3) Les acteurs possédant un contrat de réserve rapide ou complémentaire s'engagent à déposer tous les jours la puissance contractualisée sur le mécanisme d'ajustement. Contraintes R. Rapides = min 50 MW activables 2 fois par jour pdt 1h. Contraintes R. complémentaires = min 25 MW activables 1 fois par jour pdt 6h.
4) Sur la base des niveaux de rémunération récents et publiés par RTE (pour 2015-2016)
Source: CRE, RTE

Figure 8 : Synthèse des mécanismes de gestion des déséquilibres à disposition de RTE

2.2.2.6. Le mécanisme d'interruptibilité

Le mécanisme d'interruptibilité consiste à réduire de manière instantanée et sans préavis la puissance de soutirage d'un utilisateur raccordé au réseau électrique. Ce type de services permet de **pallier des situations graves et fortuites du système électrique** résultant d'un déséquilibre entre la production et la consommation ou d'une contrainte de réseau. Il peut être utilisé en **dernier recours** ou comme moyen complémentaire à une mobilisation partielle de la réserve primaire de fréquence mais n'a pas vocation à remplacer les moyens qui contribuent au renforcement de la sécurité d'approvisionnement.

Ce mécanisme s'adresse uniquement aux grands consommateurs industriels directement raccordés au réseau de transport. L'arrêté du 22 décembre 2015 modifie les exigences initialement fixées en 2012 sur les capacités interruptibles. En particulier, il partitionne le mécanisme en deux catégories, pour des niveaux de rémunération et de contraintes différents. La capacité interruptible de chacun des sites agréés doit être supérieure à 40 MW (pour la catégorie 1) et comprise entre 25 et 100 MW (pour la catégorie 2). Ces capacités interruptibles doivent pouvoir être contrôlées et activables par le gestionnaire du réseau de transport (RTE), à son initiative et sans préavis, dans un délai inférieur à 5 secondes pour la catégorie 1 (30 secondes pour la catégorie 2). Pour ces raisons, un système de contrôle commande activable à distance est le plus souvent mis en place, sous contrôle de RTE lui-même, afin de garantir la réactivité nécessaire. La durée d'interruptibilité est comprise entre 15 minutes et 1 heure et la capacité activable jusqu'à 10 fois par an au maximum pour la catégorie 1 (5 fois pour la catégorie 2). Les exigences de disponibilité diffèrent aussi entre les deux catégories et sont de 7500 heures par an minimum pour la catégorie 1 et 4500 heures par an minimum pour la catégorie 2.

Au-delà de la modification des critères techniques, l'objectif national ciblé en volume a aussi été revu à la hausse : initialement restreint à un volume maximal de 400 MW, le volume national visé de capacité interruptible est aujourd'hui de 1100 MW pour la catégorie 1 et 400 MW pour la catégorie 2, soit 1500 MW ciblé au total. **La rémunération de capacités interruptible est plafonnée à 70 €/kW/an pour la catégorie 1 et 30 €/kW/an pour la catégorie 2**, avec un système annulant la rémunération en-dessous d'un certain seuil de disponibilité (7000 h/an pour la catégorie 1, 4000 h/an pour la catégorie 2) et infligeant des pénalités au-delà. Afin que la capacité interruptible cumulée des contrats d'interruptibilité n'excède pas les volumes ciblés, le gestionnaire du réseau de transport réalise, le cas échéant, une sélection sur la base du montant de la compensation demandée et proposée à RTE par le site candidat.

Depuis 2015, ce mécanisme est cumulable avec les autres appels d'offres gérés par RTE permettant la rémunération de capacités flexibles (réserves rapides, réserves complémentaires et AO Effacement) sous réserve de ne pas rémunérer la puissance interruptible les jours où elle est effectivement activée sur ces autres mécanismes. Les capacités interruptibles peuvent ainsi être mobilisées au service du système électrique.

Le tableau de synthèse ci-dessous résume les caractéristiques du mécanisme d'interruptibilité.

	Volume national visé	Puissance interruptible d'un site	Rémunération maximale	Disponibilité	Délai d'activation	Durée activation	Nombre maximal d'activations	Pénalités
Catégorie 1	1 GW	40 MW	90 €/kW/an	> 7500 h/an	< 5s	> 1/4 h	10 /an	Rémunération nulle si la disponibilité est égale à 6500h + pénalités applicables en dessous de cette valeur.
Catégorie 2	600 MW	25 MW - 100 MW	30 €/kW/an	> 4500 h/an	< 30s	> 1/4 h	5 /an	Rémunération nulle si la disponibilité est égale à 4000h + pénalités applicables en dessous de cette valeur.

2.2.3. Le mécanisme de capacité

Le mécanisme de capacité mis en place par RTE et les pouvoirs publics (suite à la loi NOME) a pour objectif de garantir la sécurité d'approvisionnement du système électrique à moyen et long terme et de faire face aux

problématiques liées au marché dit « *Energy only* », c'est-à-dire reposant uniquement sur la vente d'énergie pour rentabiliser les investissements dans les outils de production.

Le principe du mécanisme est d'imposer aux fournisseurs d'électricité des obligations de capacités proportionnelles à la consommation de leur portefeuille de clients lors des pointes de consommation hivernales. Pour répondre à ces obligations et éviter de payer des pénalités, les fournisseurs/consommateurs (acteurs obligés) doivent justifier d'un nombre suffisant de « garanties de capacités » (certificats) issues soit de leurs propres actifs de production (ou d'effacement) soit achetées à des producteurs (ou opérateurs d'effacement) sur le marché organisé ou de gré à gré.

Ces « garanties de capacités » doivent être certifiées par RTE et peuvent être certifiées et vendues jusqu'à ~3 ans avant l'« année de livraison », c'est-à-dire l'année pour laquelle elles devront garantir leur disponibilité et seront contrôlées, l'objectif étant d'inciter en amont à l'investissement.

Ce mécanisme de capacité constitue ainsi une nouvelle source de rémunération pour les capacités d'effacement qui peuvent être valorisées via ce mécanisme de deux manières différentes :

- soit explicitement – côté « offre » : c'est-à-dire en faisant l'objet d'une certification et bénéficiant d'une garantie de capacité qui peut par la suite être éventuellement vendue à un acteur obligé. En effet, au même titre que les capacités de production d'électricité, les capacités d'effacement peuvent participer au mécanisme et donner droit à des garanties de capacités – sous réserve de certification par RTE.
- soit implicitement – « côté demande » : c'est-à-dire en étant utilisées pour réduire la consommation à la pointe des consommateurs chez qui elles sont mises en place, dans l'objectif de réduire les obligations des fournisseurs.

Selon la manière dont les capacités d'effacement sont valorisées (ie explicitement côté « offre » ou implicitement côté « demande »), les exigences de disponibilité sont légèrement différentes mais le principe est similaire : les capacités doivent être disponibles (si valorisées explicitement) ou activées (si valorisées implicitement) sur les heures des plages [7h00 ; 15h00[et [18h00 ; 20h00[lors des jours de contrôle qui sont sélectionnés par RTE en J-1, en fonction des prévisions de consommation du jour pour le lendemain, et qui doivent correspondre aux jours de pointe de consommation hivernale. Les jours de contrôle pour les capacités valorisées implicitement côté « demande » correspondent à la période dite « PP1 » sur laquelle les obligations des fournisseurs seront calculées (10 à 15 jours ouvrés par an lors de l'hiver) et au cours desquelles les capacités valorisées implicitement doivent donc être activées. Les jours de contrôle pour les capacités valorisées explicitement côté « offre » correspondent à la période dite « PP2 » sur laquelle les capacités certifiées (production ou effacement) seront contrôlées (10 à 25 jours par an lors de l'hiver) et doivent donc être disponibles.

Les niveaux de prix de la capacité et de la rémunération accessible pour les capacités d'effacement dépendront, pour chaque année, de l'équilibre offre/demande entre « garanties de capacités » et prévisions d'« obligations de capacités » pour les acteurs obligés. **Le résultat de la première enchère de capacité (15 décembre 2016) pour l'année de livraison 2017 est de 10 €/kW/an de garantie de capacité** (i.e. kW disponible sur 10h par jour sur tous les jours PP2).

2.2.4. Le mécanisme NEBEF, valorisation des effacements sur le marché « énergie »

Comme l'explique RTE dans son document décrivant les règles du mécanisme NEBEF (Notification d'Echange de Bloc d'Effacement), dans l'organisation historique des marchés de l'énergie, les effacements ne pouvaient être valorisés que de façon « implicite » dans le cadre d'une optimisation privée au sein d'un portefeuille de fourniture. Il n'existait néanmoins pas de possibilité de valorisation « explicite » de l'énergie issue d'effacements sur les marchés de l'électricité. C'est cette possibilité nouvelle qu'offre le mécanisme NEBEF mis en place par RTE depuis les années 2013 (règles expérimentales 1.0) et fin 2014 (règles NEBEF 2.0).

Ce mécanisme consiste notamment à organiser les flux financiers entre les différents acteurs afin de permettre la valorisation d'effacements sur le marché énergie, pour un site de consommation donné (ou une agrégation de sites de consommation), par un opérateur d'effacement distinct du (ou des) fournisseurs de ce (ces) site(s).

RTE, en tant que tiers de confiance, est en charge du contrôle de la réalisation de l'énergie effacée dite « Bloc d'Effacement ». Ce bloc d'effacement est ensuite déduit du périmètre d'équilibre du fournisseur d'électricité. L'opérateur d'effacement peut alors valoriser sur les marchés énergie aux prix de marché la quantité d'énergie effacée (correspondant au « Bloc d'effacement ») mais doit verser une compensation au fournisseur du site effacé dite « versement ». Pour RTE, le versement doit permettre de rémunérer le fournisseur pour l'énergie qu'il a injectée, sans laquelle l'effacement offert par l'opérateur d'effacement ne saurait être fongible avec les offres de production sur les marchés de l'électricité.

Ce mécanisme permet donc aux opérateurs d'effacement de pouvoir valoriser des capacités d'effacement sur les marchés énergies et donc de valoriser la flexibilité que représentent les effacements pour optimiser l'équilibre offre-demande, en augmentant l'élasticité de la demande au prix et permettant donc une réduction de la demande lors de périodes de prix élevés.

Le niveau de rémunération accessible du point de vue de l'industriel dépend donc entièrement des prix horaires de l'énergie sur les marchés (spot et ajustement) et correspond à une rémunération du MWh réellement effacé (et non de la capacité disponible, c'est donc une rémunération à l'activation) égale à :

(Prix de marché [€/MWh] – Montant du versement [€/MWh] – Coût d'activation¹⁹) * Volumes effacés [MWh]

Ici, les gains potentiels liés à l'économie de facture énergétique pour l'énergie effacée (si non reportée) n'est pas prise en compte.

Concernant les montants de versements à payer aux fournisseurs, la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte introduit en 2015 un régime dérogatoire s'appliquant aux effacements donnant lieu à des économies d'énergie significatives. Le versement de la part économisée sera réparti entre l'opérateur d'effacement et le gestionnaire du réseau de transport. La caractérisation de tels effacements sera définie par un décret à venir.

Les volumes déclarés sur NEBEF atteignent environ 10,5 GWh en 2016²⁰.

2.2.5. Autres mécanismes de valorisation : les offres des fournisseurs d'électricité

En complément des différents mécanismes « explicites » de valorisation des effacements existants (ie les marchés de réserves, le mécanisme d'ajustement, le futur mécanisme de capacité et le mécanisme NEBEF), les capacités d'effacement des consommateurs peuvent être valorisées directement dans les contrats de fourniture proposés par les fournisseurs d'électricité. En effet, à l'image des tarifs réglementés EJP, les fournisseurs peuvent négocier avec leurs clients un contrat de fourniture spécifique basé, soit sur une différenciation temporelle du prix de l'énergie incitant à l'effacement lors de certaines périodes, soit sur une valorisation explicite de capacités d'effacement activées sur demande du fournisseur.

NB : A l'heure actuelle, la valorisation des effacements n'est possible qu'à la maille « nationale ». Néanmoins, une évolution réglementaire en vue de permettre la valorisation des effacements au service des gestionnaires de réseaux de distribution (limitation des appels de puissance au niveau du réseau de distribution et de fait

¹⁹ Le coût d'activation incluant l'intégralité des coûts liés à la modulation de process (perte de production, désorganisation des process)

²⁰ Source RTE

limitation des investissements réseaux nécessaires), est en cours de réflexion. A l'heure actuelle, les expérimentations de valorisation de flexibilité au niveau local sont rendues possibles par l'article 199 de la loi de transition énergétique pour la croissance verte.

2.3. Benchmark des mécanismes de valorisation à l'international : Royaume-Uni, Japon et Etats-Unis (PJM et CAISO)

2.3.1. Royaume Uni

2.3.1.1. Synthèse

Le transporteur et opérateur du système National Grid, afin de s'adapter aux changements sur le marché de l'électricité britannique, valorise aujourd'hui ~2 GW d'effacement grâce à un cadre réglementaire avancé et une multiplicité de mécanismes permettant une participation de l'effacement (mécanismes gérés par National Grid en vue d'équilibrer le réseau, mécanismes implicites de réduction des charges réseau, marché de capacité). National Grid cherche à intégrer davantage de capacités d'effacement en proposant un cadre réglementaire favorable (flexibilité des mécanismes, mécanismes dédiés ou adaptés aux effacements)

- Le marché britannique de l'électricité est organisé autour de plusieurs acteurs clés : le transporteur National Grid, également opérateur de système électrique, les distributeurs, l'OFGEM (*Office of Gas and Electricity Markets*) organisme indépendant régulateur des marchés électrique et gazier. National Grid, en tant qu'opérateur du système, assure l'équilibrage du réseau au niveau national et gère donc la plupart des mécanismes permettant la valorisation des capacités d'effacement au Royaume-Uni. Afin de faire face à des projections de croissance de la demande électrique et aux remplacements nécessaires de certaines unités de production, le gouvernement a promulgué en 2013 l'*Electricity Market Reform* (EMR) qui a entériné la création d'un marché de capacité pour assurer un niveau de capacité suffisant et la mise en place d'un complément de rémunération pour soutenir le développement d'une électricité décarbonée.
- Aujourd'hui, afin de s'adapter à ces changements sur le marché de l'électricité, National Grid incite au développement de davantage d'effacement et estime que la capacité totale d'effacement valorisée au Royaume-Uni est d'approximativement 2 GW (dont environ 1,5 GW valorisé de manière implicite par une réduction des coûts d'utilisation du réseau pour les industriels - cf mécanismes TRIADS définis en paragraphe 2.3.1.4.1) et prévoit une participation de 3,5 GW à horizon 2018/2019 (avec une croissance principalement liée à la mise en place du marché de capacité)
- Une grande partie de la capacité d'effacement actuellement valorisée sur les différents mécanismes (et principalement sur le mécanisme de régulation en énergie, réserve tertiaire – la *Short Term Operating Reserve* (STOR) – qui est le mécanisme présentant la plus grande participation d'effacement) est constituée de générateurs diesel de secours (chiffres National Grid). En effet, sur les 3 GW de capacité disponible sur STOR, ~850 MW constituent de l'effacement ; cet effacement étant à 80% de l'effacement avec autoproduction sur un groupe électrogène.
- Les capacités d'effacement sont encore en développement au Royaume-Uni mais l'organisation du marché de l'électricité et le cadre réglementaire relatif aux effacements de consommation est, à l'image de la France, déjà bien développé et permet la participation/valorisation du consommateur (effacement, modulation) à de nombreux mécanismes par la multiplicité des services accessibles (et/ou

adaptés) à l'effacement : *ancillary services (Frequency Response, Frequency Control by Demand Management, Short Term Operating Reserve)*, *Demand Side Balancing Reserve*, mise en place d'un marché de capacité, et mécanismes de réduction des charges d'utilisation des réseaux de distribution net transport. Ces mécanismes répondent à des besoins de flexibilité et donnent lieu à des contraintes différentes (délais et durée d'activation, taille minimale pour participer, design des services)

- La comparaison entre les marchés britannique et français montre que l'organisation des marchés peut être différente entre les mécanismes et que certains mécanismes britanniques sont absents en France (ex : valorisation implicite de l'effacement par une réduction des coûts d'utilisation du réseau de transport pour les industriels, ou la *Demand Side Balancing Reserve*, mécanisme peu contraignant dédié à l'effacement pour inciter au développement de capacités – voir Paragraphe 2.3.1.3.1.5)
 - **Accès au marché énergie** : Par rapport au marché français, la participation des effacements au marché de l'énergie (et en particulier des opérateurs d'effacement indépendants des fournisseurs) est plus complexe et moins adaptée. En effet, afin de pouvoir participer aux marchés énergie, les opérateurs d'effacement doivent avoir le statut de *BSC parties*, un statut complexe à obtenir auprès de l'entité en charge du *Balancing and Settlement Code*, Elexon. Ceci explique la faible participation des modules d'effacement aux marchés de l'énergie.
 - **Existence d'un mécanisme dédié à l'effacement, peu contraignant pour les participants, la *Demand Side Balancing Reserve*, complétant le mécanisme de réserves tertiaires (STOR), pour permettre aux acteurs de « tester l'effacement »** : La DSBR est un mécanisme exclusivement dédié aux capacités d'effacement qui se rendent disponibles lors des soirées de semaine en hiver. Les contraintes techniques de participation y sont faibles et nécessitent peu d'investissements. Ce mécanisme a été mis en place spécifiquement à destination de l'effacement dans le but de le développer au Royaume-Uni, ce qui peut l'apparenter à l'appel d'offres effacement en France. L'initiative permet à l'opérateur du système d'identifier des capacités d'effacement potentielles qui pourraient participer à certains mécanismes répondant à un besoin de flexibilité pour le réseau national.
 - **Réduction des charges d'utilisation des réseaux de transport pour les clients industriels** : Le système de calcul des charges d'utilisation des réseaux de transport au Royaume-Uni permet une valorisation implicite de l'effacement pour les consommateurs (industriels et tertiaires). En effet, le calcul des charges d'utilisation du réseau de transport pour les industriels est effectué sur les quelques heures de pointe de consommation qui sont les heures les plus coûteuses en termes de gestion du réseau de transport, les clients industriels sont donc incités à s'effacer momentanément sur ces heures-clés en vue de réduire leur facture réseau. Ce mécanisme est le principal mécanisme de valorisation des capacités d'effacement (~1,5 GW). Cette incitation existe aussi en France dans une moindre mesure via l'horosaisonnalité du TURPE (tarif d'utilisation du réseau public d'électricité) mais l'incitation est beaucoup moins forte qu'au Royaume-Uni.

Plus grande flexibilité accordée à l'effacement dans les règles de participation à certains mécanismes : Les mécanismes britanniques permettent une flexibilité qui va dans le sens d'une intégration de davantage de capacités d'effacement. Sur le mécanisme de contrôle de la fréquence par exemple, qui nécessite un ajustement à la hausse par moments et à la baisse à d'autres, les participants peuvent proposer des capacités à la hausse, à la baisse, ou des capacités symétriques. Cela rend la gestion plus complexe pour l'opérateur du système National Grid mais permet la participation plus large des capacités, notamment des capacités d'effacement qui sont souvent seulement activables à la hausse. Jusqu'à présent en France, les capacités participant aux services systèmes devaient être activables à la hausse comme à la baisse ; cependant, à partir du 1^{er} octobre 2016, la participation des capacités dissymétriques est rendue possible.

2.3.1.2. Contexte de marché : Organisation du marché de l'électricité & parties prenantes

Le marché britannique de l'électricité est organisé autour de plusieurs acteurs clés : le transporteur National Grid qui est également opérateur de système électrique, équivalent de RTE en France, les distributeurs qui sont au nombre de 8 pour la Grande Bretagne contre principalement Enedis (ex ERDF) en France, et l'OFGEM (*Office of Gas and Electricity Markets*) organisme indépendant régulateur des marchés électrique et gazier, équivalent de la Commission de Régulation de l'Energie française.

National Grid, en tant qu'opérateur du système électrique, est en charge de l'équilibrage de l'offre et de la demande sur le réseau électrique heure par heure et minute par minute en tout point du réseau. L'opérateur est également en charge de la sécurité d'approvisionnement d'électricité. Pour cela, National Grid gère la majorité des mécanismes permettant de valoriser de l'effacement au Royaume Uni (les réserves primaires à tertiaire, implicitement le système des TRIADS, le marché de capacité...).

Afin de faire face à des projections de croissance de la demande électrique et aux remplacements nécessaires de certaines unités de production, le gouvernement a promulgué en 2013 l'*Electricity Market Reform* (EMR). Cette politique gouvernementale a pour objectif d'inciter à des investissements dans des sources d'électricité décarbonées, d'améliorer la sécurité d'approvisionnement de la Grande-Bretagne et de limiter les coûts pour les consommateurs en introduisant notamment un marché de capacité (Capacity Market) ainsi qu'un nouveau mécanisme de rémunération des installations de production décarbonées (*Contract for Difference*).

De son côté et afin de s'adapter à ces changements sur le marché de l'électricité, National Grid incite au développement de davantage de capacités d'effacement en favorisant l'intégration de l'effacement aux mécanismes existants, en créant le marché de capacité, en promouvant la flexibilité via l'initiative **Power Responsive**. Il s'agit d'un programme collaboratif rassemblant les fournisseurs, les consommateurs, les entités réglementaires et plus généralement les parties prenantes de la flexibilité afin d'augmenter la contribution de l'effacement au marché électrique à horizon 2020.



Figure 9: Localisation géographique des distributeurs au Royaume-Uni

2.3.1.3. Mécanismes de valorisation de l'effacement

	MECANISME	Rationnel	CONSTATS
Mécanismes d'équilibrage du réseau gérés par National Grid	Fast Reserve	Réponse rapide à des variations importantes de la fréquence	- Appels d'offres organisés par National Grid - Réserve primaire (activation en 2 secondes, 50MW minimum) - Pas de participation de l'effacement à date
	Firm Frequency Response	Réponse rapide à des variations de la fréquence	- Appels d'offres organisés par National Grid - Capacité minimale de 10 MW pour la FFR, Délai d'activation <30s, disponibilité : 30 minutes minimum
	Frequency Control by Demand Management	- Réponse rapide à des variations de la fréquence - Dédié à l'effacement	- Contrats gré à gré entre National Grid et les participants - Capacité minimale de 3MW, Délai d'activation <30s, disponibilité : 30 minutes minimum
	Short Term Operating Reserve	Réponse en quelques minutes à des déséquilibres de puissance	- Appels d'offres organisés par National Grid - Capacité minimale de 3MW, Délai d'activation <20min, disponibilité : 2 heures minimum - Demand Side Response : ~25% du marché STOR
	Demand Side Balancing Reserve	Réponse en quelques minutes à des déséquilibres de puissance en période de pointe (soirs de semaine en hiver)	- Appels d'offres organisés par National Grid - Capacité minimale de 2MW, Délai d'activation <2heures, disponibilité : 1 heure minimum - Exclusivement dédié à l'effacement
Valorisation implicite	Distribution and transmission charges avoidance	Assurer la sécurité d'approvisionnement en période de pointe	- Mécanismes implicites incitant les consommateurs à s'effacer pour éviter les charges : - Triads : système de calcul des charges d'utilisation du réseau de transmission « Red band avoidance » : réduction des charges d'utilisation des réseaux de distribution ~1,5GW estimés par National Grid valorisés sur ces mécanismes
Organisé par National Grid	Capacity Market	Assurer la sécurité d'approvisionnement en période de pointe	- Capacité minimale : 2MW - Résultats de la première enchère (2014, pour une capacité délivrée en 2018) : 49,26 GW à 19,4€/kW : Moins de 200MW d'effacement, soit <1% du volume de l'enchère
	Energy markets	Valoriser les blocs d'effacement sur les marchés énergie	- Participation de l'effacement aux marchés énergie - Peu de participation de l'effacement

2.3.1.3.1. Mécanismes gérés par National Grid en vue d'équilibrer le réseau en temps réel

Les services d'équilibrage sont organisés par National Grid afin de répondre à ses différents besoins de contrôle : fréquence, tension, énergie. Pour cela, l'opérateur système fait appel à des capacités disponibles (de production et/ou de flexibilité) par le biais de différents mécanismes qui fonctionnent principalement sur des appels d'offres. Pour la plupart de ces services, les fournisseurs (production ou réduction de demande) sont rémunérés pour la disponibilité de leur capacité (paiement de la capacité – *activation payment*) et lors d'une activation demandée par National Grid (paiement de l'énergie – *utilization payment*).

National Grid permet une participation de l'effacement à 5 principaux mécanismes d'équilibrage :

- Les mécanismes gestion des déséquilibres à très court terme (réserves primaire et secondaire-activation en quelques secondes) : *Fast Reserve*, *Firm Frequency Response* et *Frequency Control by Demand Management*
- Les mécanismes de gestion des déséquilibres à moyen terme (réserve tertiaire – activation entre quelques minutes et quelques heures) : *Short Term Operating Reserve* et *Demand Side Balancing Reserve*

2.3.1.3.1.1. Fast Reserve

La Fast Reserve est un mécanisme utilisé par National Grid pour contrôler la fréquence du réseau lorsque des changements soudains et importants apparaissent. Les fournisseurs de Fast Reserve doivent pouvoir répondre en moins de 2 minutes avec une puissance minimum de 50 MW atteinte en moins de 4 minutes. Cette demande d'une réponse très rapide et très puissante est principalement réalisée par des STEP (Stations de transfert d'énergie par pompage) capables de délivrer rapidement une grande puissance en ouvrant des vannes.

Le mécanisme autorise la participation de capacités d'effacement mais en pratique ce marché est dominé par les capacités de génération (principalement STEP, mais également des tests sur de l'agrégation de production décentralisée et des cycles combinés gaz).

2.3.1.3.1.2. Firm Frequency Response (FFR)

La *Firm Frequency Response* est le mécanisme de contrôle de la fréquence du système (afin de maintenir une fréquence du réseau située entre 49,8 Hz et 50,2 Hz) pour lequel les capacités doivent être asservies à un déclenchement automatique sur signal de National Grid et être capables de s'activer en moins de 10 à 30 secondes et représenter au minimum 10 MW de capacité. Les appels d'offre organisés par National Grid ont lieu mensuellement électroniquement. A noter que la FFR est actuellement un des mécanismes d'équilibrage de National Grid qui rémunère le mieux l'effacement, entre 15 et 40 000 £/MW/an.

Il existe deux types de réponse en fréquence : la *Dynamic Frequency Response* utilisée par l'opérateur du système (National Grid) pour réguler la fréquence en fonctionnement normal du réseau et la *Static Frequency Response* activée lors d'un défaut sur le réseau (ex : panne d'une centrale de production). La réponse dynamique exige d'avoir une activation très fréquente de la capacité, elle est donc nettement plus difficile à mettre en œuvre sur un site d'effacement unique que sur un portefeuille de sites agrégés.

La FFR peut être comparée avec les services systèmes de RTE en France. Les principales différences que l'on peut constater à l'heure actuelle sont la plus grande ouverture du mécanisme à l'effacement ainsi qu'une plus grande flexibilité sur les critères requis pour participer au mécanisme. D'une part, la FFR est ouverte aux capacités d'effacement depuis plusieurs années et un service (*FFR Bridging Contract*) permet aux capacités d'effacement de plus de 1 MW mais n'atteignant pas le seuil de participation de 10 MW de participer. D'autre part, les fournisseurs de capacité sur la FFR peuvent proposer des services à la hausse, à la baisse ou les deux.

Exemple d'industrie participant à la *Firm Frequency Response* – Industrie de la distribution et traitement de l'eau

Depuis 2014, United Utilities, une des principales compagnies de distribution et traitement des eaux en Angleterre, participe à la *Dynamic Frequency Response* via l'agrégateur Open Energi. United Utilities envisage à horizon 2020 de valoriser 20 MW de capacité flexible sur l'ensemble du Nord-Ouest de l'Angleterre où la société opère.

L'effacement a lieu principalement sur les usages de différentes pompes et moteurs (aération) qui peuvent répondre en quelques secondes selon les fonctions remplies par ces process.

2.3.1.3.1.3. Frequency Control by Demand Management

La *Frequency Control by Demand Management* (FCDM) est un mécanisme de réponse très rapide (activation en 2 secondes) sur une courte période de temps (~30 minutes) destiné à contrôler la fréquence du

réseau en interrompant automatiquement la consommation des participants lorsque la fréquence passe en dessous du seuil de 49,7 Hz en cas de panne sur une centrale de production par exemple. Ce mécanisme pourrait s'apparenter à l'interruptibilité, à la différence que le seuil de capacité à fournir est de 3 MW, plus faible que pour l'interruptibilité en France.

La FCDM est organisée par National Grid sous la forme de contrats de gré à gré signés entre l'opérateur du système et le participant. Les participants à ce service doivent alors être équipés d'un dispositif relais d'asservissement de la capacité à ce seuil de fréquence et fournir un minimum de 3 MW de capacité. Les capacités sont contractées préférentiellement par site plutôt que via des portefeuilles agrégés.

Les contraintes techniques liées à la FCDM et le fait que les capacités agrégées soient moins prioritaires favorisent la participation d'industriels au mécanisme sur des effacements de process industriels (par exemple : gaz industriels, cimentiers, chimie, agroalimentaire) mais également sur le secteur tertiaire (froid, retail, data center, traitement et distribution des eaux) sur des capacités dépassant les 3 MW.

2.3.1.3.1.4. Short Term Operating Reserve (STOR)

Dans le cadre d'un équilibrage en puissance, National Grid a besoin d'ajuster son niveau de capacité de production à un instant donné en cas d'écart de la demande avec les prévisions effectuées ou en cas de panne sur un actif de production. La *Short Term Operating Reserve (STOR)*, équivalent des réserves rapide et complémentaire permet à National Grid de répondre à ce besoin. Ainsi, National Grid contracte ~3 GW de capacités de réserve tertiaire pour répondre à ses besoins ponctuels d'équilibrage en énergie. Sur ces 3 GW de capacité disponible sur STOR, ~850 MW constituent de l'effacement (soit ~30% de la capacité de STOR); cet effacement étant à 80% de l'effacement avec autoproduction sur un groupe électrogène.

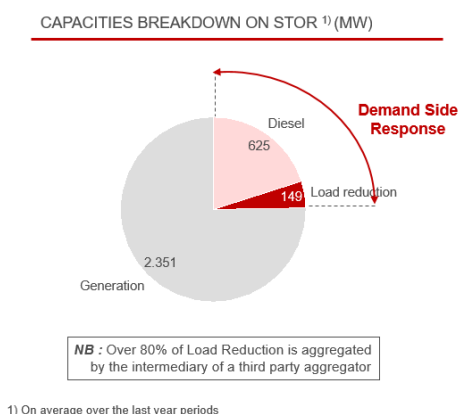


Figure 10 - Capacities breakdown by type on STOR

Ce mécanisme est historiquement celui sur lequel l'effacement est le plus présent au Royaume-Uni, notamment grâce à des contraintes techniques favorables à la participation de l'effacement (bien qu'il soit principalement lié à de l'effacement avec autoproduction via un groupe électrogène – Cf illustration ci-dessous). En effet, afin de pouvoir participer à STOR, un opérateur doit fournir au minimum 3 MW en moins de 20 minutes et être activable sur des durées supérieures à 2 heures. Par ailleurs, l'opérateur doit pouvoir accepter une fréquence d'activation de 3 par semaine. En échange de ce service, l'opérateur est rémunéré à la capacité (*availability payment*) et à l'énergie (*utilization payment*).

La participation à STOR peut être flexible et permettre aux opérateurs d'effacement de proposer des capacités sur des périodes adaptées aux différentes contraintes opérationnelles des process effacés chez leurs clients. En effet, le service est organisé sous la forme d'appels d'offres gérés par National Grid (3 fois par an) et les opérateurs peuvent choisir un service « *committed* » (disponibilité sur l'ensemble des périodes sur lesquels STOR peut être activé, les *availability windows*) ou « *flexible* » (l'opérateur choisit de n'être disponible que sur certaines des *availability windows*).

AVAILABILITY AND UTILIZATION COSTS OF STOR CAPACITIES [£/MW/h ; £/MWh]

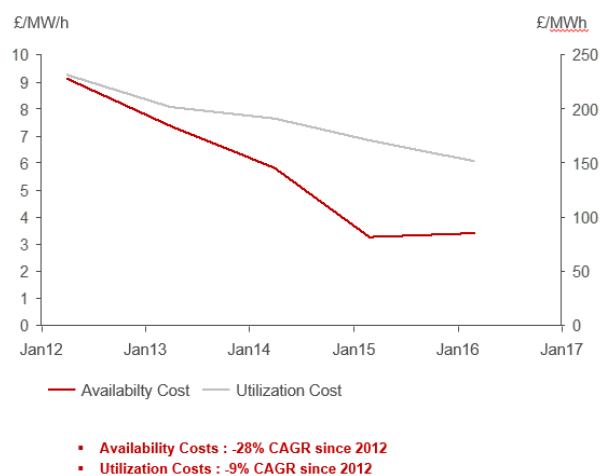


Figure 11 - Evolution des prix sur STOR entre 2012 et 2016

On constate que les prix sur STOR ont évolué à la baisse depuis 2012, cette baisse étant principalement liée à une compétition accrue sur les appels d'offre STOR : en effet, les prix de la capacité ont perdu en moyenne 22% par an depuis 2012, et les prix de l'énergie 10% par an.

La *Short Term Operating Reserve* peut être comparée aux réserves rapide et complémentaire activables par RTE pour pallier le défaut d'une centrale de production, tant dans la définition du besoin de flexibilité associé que dans le fonctionnement.

2.3.1.3.1.5. Demand Side Balancing Reserve (DSBR)

La *Demand Side Balancing Reserve* (DSBR) est un mécanisme mis en place en 2014 par National Grid en complément de STOR exclusivement réservé aux capacités d'effacement. Ce mécanisme est destiné aux clients ayant d'importantes consommations d'énergie qu'ils peuvent effacer sur les périodes sur lesquelles la DSBR peut être sollicitée (les soirs entre 16h et 20h des jours ouvrés des 4 mois d'hiver). Les puissances contractées doivent être activables en moins de 2 heures pour des durées supérieures à 1 h.

Un des objectifs de National Grid à la mise en place de ce mécanisme (qui devrait théoriquement être temporaire et disparaître après l'implémentation du marché de capacité) était d'identifier les capacités d'effacement non exploitées en donnant aux potentiels opérateurs la possibilité de participer à un mécanisme peu contraignant. En effet, aucune technologie additionnelle n'est requise au-delà de la possession d'un compteur communicant au pas semi-horaire, le signal d'activation étant fourni par téléphone par National Grid.

La rémunération de la DSBR s'effectue sur la disponibilité (l'activation étant très rare, pas d'activation en 2014/2015 et une activation en 2015/2016), à des niveaux entre 4 000 et 16 000 £/MW/an. A l'heure actuelle, les participants potentiels à la DSBR sont l'ensemble des consommateurs ayant une importante consommation relativement stable, les utilities et les compagnies de distribution et traitement des eaux. London Underground, opérateur du réseau de métros londoniens participe également à la DSBR en proposant au mécanisme 55 MW d'effacement.

2.3.1.4. Réduction des charges réseau

2.3.1.4.1. Annual Transmission Network Use of System charges (Triad)

Le système Triad est le système permettant à National Grid de calculer les charges liées à l'utilisation du réseau de transport pour les clients industriels. Ces charges visent à compenser les coûts de maintenance et les investissements sur le réseau faits par le transporteur. Elles sont calculées, pour les clients non domestiques, sur trois périodes de comptage (pas semi-horaire au Royaume-Uni) sélectionnées par National Grid sur les heures de pics extrêmes de consommation et non annoncées à l'avance. Elles sont calculées sur la moyenne des consommations de ces trois périodes et prélevées par National Grid auprès des fournisseurs d'électricité qui les répercutent directement ou indirectement sur leurs clients. Elles intègrent une part de prix localisés (en fonction de la distance du point de livraison aux zones de pics de consommation) et une part non localisée.

L'enjeu est donc à la fois la prévision de ces périodes ainsi que la capacité à réduire sa consommation, à s'effacer sur ces périodes (qui sont généralement au nombre de 10 à 12 par an en fonction des prévisions). On a donc une valorisation implicite incitant à faire de l'effacement de consommation car on ne parle pas de la participation à un mécanisme mais de l'optimisation en interne, pour un consommateur, de sa consommation aux heures clés sur lesquelles ces coûts d'utilisation du réseau seront calculés.

National Grid estime qu'environ 1,5 GW peut être effacé sur les périodes de *Triad avoidance* et qu'un tel effacement peut faire économiser entre 23 et 46 £/kW/an en fonction des positionnements sur le réseau. Tous les types d'effacement peuvent être amenés à participer à ce mécanisme.

2.3.1.4.2. « Red band » avoidance

Concernant les charges d'utilisation des réseaux de distribution, le calcul est effectué sur la consommation observée chaque jour sur les différentes périodes horaires (vert, orange et rouge, en fonction des charges appliquées par le distributeur, du moins cher au plus cher respectivement).

De la même façon que pour les Triads, les consommateurs non domestiques sont incités à s'effacer chaque jour sur ces périodes dites « rouges » (« *red band* » avoidance) afin de limiter le montant de leurs charges d'utilisation du réseau de distribution. Il s'agit d'une incitation tarifaire à planifier sa consommation hors des périodes de fort pic de consommation, les périodes rouges.

Ce dispositif peut être comparé aux tarifs Tempo et anciennement EJP.

2.3.1.5. Mise en place du marché de capacité

Le marché de capacité est un des mécanismes clés mis en place par l'*Electricity Market Reform* en 2013 pour garantir à la Grande Bretagne un niveau de capacités suffisant pour assurer la sécurité d'approvisionnement d'électricité. Le *Capacity Market* (CM) rémunère la capacité disponible des potentiels fournisseurs de capacité en retour d'une garantie de la part de ces fournisseurs qu'ils seront en mesure de fournir de l'énergie si le réseau en a besoin, en période de pic. La première année de livraison est l'hiver 2018/2019 pour une enchère initiale effectuée en 2014.

National Grid est en charge de l'organisation de ce marché : recommandation sur le niveau de capacités nécessaire, pré-qualification des capacités potentielles (*Capacity Market Units*, CMU), organisation des enchères capacitaires, notifications de *CM warnings* (notifications d'un besoin d'activation des capacités engagées lors d'un période de stress du réseau).

Les critères de pré-qualification sont déterminés par le rationnel du CM, la sécurité d'approvisionnement du réseau électrique. Lorsque National Grid produit un CM warning, la capacité activée

doit être d'au moins 2 MW, doit pouvoir répondre en moins de 4 h et être active pendant toute la durée de l'événement de stress sur le réseau.

Les enchères initiales sont organisées 4 ans avant l'hiver de livraison. Elles sont rémunérées en « *pay as cleared* », l'ensemble des capacités retenues seront toutes rémunérées au même prix. Ainsi, les CMU existantes et ne nécessitant aucun investissement supplémentaire sont *price-takers* alors que les CMU prospectives, qui nécessitent un investissement comme les unités nécessitant un *retrofit*, les capacités d'effacement ou les nouvelles capacités en construction sont *price makers* (elles ne fonctionneront que si la rémunération du marché de capacité est suffisante).

Au cours de l'enchère 2014, 49 GW de capacités ont été accordés dont 260 MW d'effacement (<1%) ; au cours de l'enchère 2015, sur 46 GW accordés, 476 MW correspondent à de l'effacement. Ce qui est ici appelé effacement inclut à la fois des générateurs diesel et de l'effacement de consommation pur.

Afin de faciliter la participation de la Demand Response au mécanisme de capacité, National Grid a lancé en 2015 pour les premières années de fonctionnement du CM un *Transitional Arrangement* (TA) consistant en une enchère de capacités annexe avec une livraison en 2016/2017 destinée aux capacités d'effacement et aux capacités de petite taille. En 2015, 802 MW ont été accordés (dont ~60% correspondent à des capacités d'effacement, le reste correspondant principalement à des petites installations existantes de production).

2.3.1.6. Participation aux marchés énergie (wholesale markets)

Au Royaume-Uni, les opérateurs d'effacement ne peuvent participer aux marchés énergie (*day ahead* et *intra-day*) que s'ils ont le statut de *BSC party* (*Balancing and Settlement Code Party*, équivalent de Responsable d'Equilibre). Ce statut est rendu difficilement accessible pour les agrégateurs *pure players*. Les *BSC parties* historiques, à savoir les fournisseurs d'électricité responsables de l'équilibrage de leurs périmètres sont verticalement intégrés et possèdent des capacités qui participent au marché énergie et cherchent à limiter l'accès des acteurs au statut de *BSC party* en complexifiant les conditions d'accès.

2.3.1.7. Principales différences avec la France

Accès au marché énergie : Au Royaume-Uni, l'absence de mécanisme du type NEBEF rend compliquée la gestion des périmètres d'équilibre entre les fournisseurs et opérateurs d'effacements. En effet, les effacements de consommation activés par les opérateurs donnent lieu à des écarts chez les fournisseurs. Par ailleurs, afin de pouvoir participer aux marchés énergie, les opérateurs d'effacement doivent être des *BSC parties*, statut complexe à obtenir. Ceci explique la faible participation des modules d'effacement à l'optimisation sur les marchés énergie.

Existence d'un mécanisme dédié à l'effacement, peu contraignant pour les participants, la *Demand Side Balancing Reserve*, complétant le mécanisme de réserves tertiaires (STOR), pour permettre aux acteurs de « tester l'effacement » : La DSBR, mécanisme mis en place spécifiquement à destination de l'effacement dans le but de le développer au Royaume-Uni. L'initiative permet à l'opérateur du système d'identifier des capacités d'effacement potentielles qui peuvent participer à ce mécanisme non contraignant mais pourraient également être valorisées sur certains mécanismes répondant à un besoin de flexibilité pour le réseau national.

Réduction des charges d'utilisation des réseaux de transport pour les clients industriels : Le système de calcul des charges d'utilisation des réseaux de transport au Royaume-Uni constitue une incitation tarifaire pour les consommateurs (industriels et tertiaires) qui n'a pas d'équivalent en France à l'heure actuelle. Les tarifs EJP et Tempo sont ce qui s'en rapproche le plus en France, à la différence que ce mécanisme est implicite et non inclus dans une offre de fourniture d'énergie. En France, l'existence de tarifs horo-saisonniers principalement pour les clients industriels représente également une forme d'incitation à la réduction de la consommation à la pointe.

Plus grande flexibilité accordée à la DR dans les règles de participation à certains mécanismes : Les mécanismes britanniques permettent une flexibilité qui va dans le sens d'une intégration de davantage de capacités d'effacement. Sur le mécanisme de contrôle de la fréquence, par exemple, qui nécessite un ajustement à la hausse par moments et à la baisse à d'autres, les participants peuvent proposer des capacités à la hausse, à la baisse, ou des capacités symétriques. Cela rend la gestion plus complexe pour l'opérateur du système National Grid mais permet la participation plus large des capacités, notamment des capacités d'effacement qui sont souvent seulement activables à la hausse. La complexité pour les opérateurs d'effacement en France dans le cadre d'une participation aux services systèmes réside dans le fait que les capacités contractées doivent être symétriques, soit s'activer indifféremment à la hausse et à la baisse.

2.3.2. Japon

Synthèse

Le marché actuel de l'effacement au Japon reste émergent. Afin de faire face aux problématiques d'approvisionnement aux pointes de consommation et suite à l'accident de Fukushima en 2011, le Japon a renforcé la mise en place de mesures d'efficacité énergétique. Néanmoins, compte tenu du contexte de récente libéralisation du marché de l'électricité, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de mécanisme de marché permettant de valorisation « explicite » de capacités d'effacement électriques. Elles sont aujourd'hui valorisées par deux principaux mécanismes de soutien gérés directement par les opérateurs historiques (un mécanisme équivalent au système d'« interruptibilité » français et un mécanisme d'effacement « planifié » lors de l'été), et plus marginalement, par la mise en place de démonstrateurs réalisés notamment dans le cadre de projets « Smart City » développés par le gouvernement depuis 2012.

2.3.2.1. Contexte : marché électrique japonais

- Le marché électrique japonais est organisé autour de 10 régions, chacune étant gérée par une compagnie électrique historique verticalement intégrée sur l'ensemble de la chaîne de valeur (production, transmission, distribution et fourniture). Ces compagnies électriques bénéficient aujourd'hui toutes de monopoles régionaux. On a donc 10 transporteurs au Japon, contre 1 seul, RTE, en France.
 - La libéralisation est en cours depuis 2010, cependant le marché reste encore principalement dominé par les acteurs historiques. Sur la commercialisation, depuis avril 2016, les clients résidentiels peuvent choisir leur fournisseur d'électricité. La production est également en cours de libéralisation.
 - Aujourd'hui ce sont donc ces opérateurs historiques qui ont la main sur les capacités de production et d'effacement.
- Cette libéralisation s'accompagne de la création d'une entité inter-régionale de coordination des opérateurs de transport : OCCTO (Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators) qui assurera des missions d'équilibrage du réseau et pourra être un acheteur potentiel d'effacement. Cette entité peut être comparée à l'ENTSOE (European Network of Transmission System Operators for Electricity) en Europe qui coordonne les activités des différents transporteurs au niveau européen.
- Pour faire face aux problématiques d'approvisionnement liées aux pointes de consommation et à la fermeture d'un certain nombre de centrales de production, au-delà des capacités d'effacement, le gouvernement a aussi très largement soutenu les mesures liées à l'efficacité énergétique centrée sur la réduction pérenne des consommations des industriels et en particulier des équipements

consommateurs lors des pointes de consommation. En effet, la loi sur l'efficacité énergétique, promulguée en 1979 et remaniée un certain nombre de fois vise à inciter tous les secteurs à limiter leur consommation électrique. Le remaniement de 2013 vise notamment à lisser la consommation énergétique de l'industrie en période de pics de consommation et à développer la mise en place. Cette loi de 2013 impose des directives à suivre aux industriels pendant les pics de consommation (entre 8h et 22h sur les mois d'hiver et d'été, comme par exemple le décalage de la production ou la rationalisation de la consommation...) et met en place des subventions pour le financement de projets d'efficacité électrique (financements directs, prêts aux PME, audits énergétiques subventionnés). Cependant, ces mesures seules ne sont pas suffisantes à réguler les questions d'approvisionnement de l'électricité. En effet, l'application des directives de lissage n'est pas contrôlée et ces mesures ciblent principalement les entreprises avec une large consommation, un fort potentiel non exploité réside chez les plus petits consommateurs.²¹

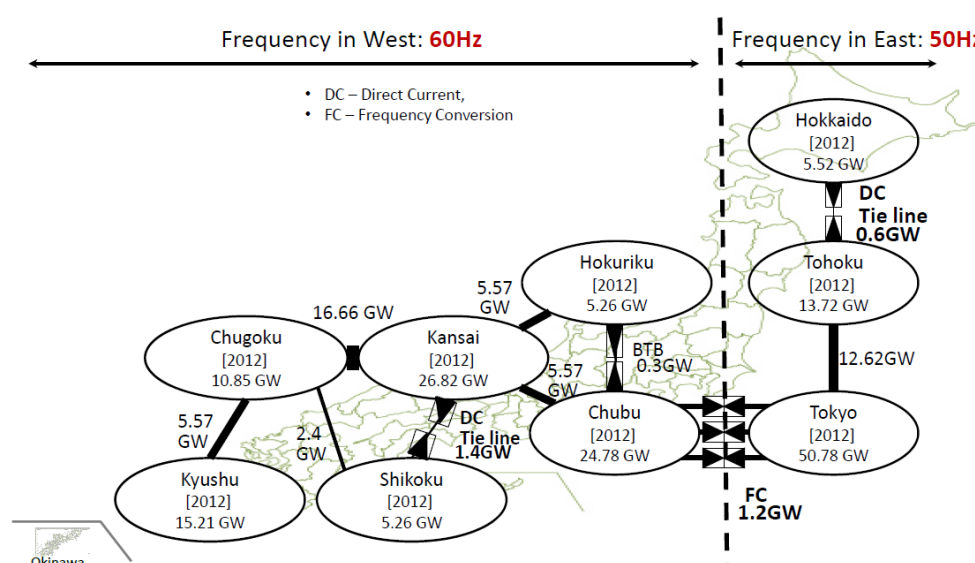


Figure 12 : Schéma des régions électriques japonaises

2.3.2.2. Valorisation des effacements au Japon

- Le marché actuel de l'effacement au Japon reste émergent. Les premiers projets pilotes de développement d'effacement sont apparus en 2012, après l'accident de Fukushima. En effet, afin de faire face aux potentiels challenges structurels d'approvisionnement en électricité à court et long termes, le Ministère de l'Energie, du Commerce et de l'Industrie (METI) a lancé une série d'actions. La principale est l'incitation auprès des opérateurs historiques d'effacement chez les industriels et entreprises du tertiaire rémunérés principalement de deux manières, décrites au paragraphe 2.3.2.3. Par ailleurs, le METI a lancé plusieurs initiatives parmi lesquelles : la mise en place d'un fonds de soutien au développement des technologies d'effacement soutenant notamment la mise en place de plusieurs démonstrateurs d'effacement, un déploiement important de compteurs intelligents ainsi qu'une phase complémentaire de réforme du marché de l'électricité.

²¹ Source : ADEME, *Efficacité énergétique dans l'industrie - Benchmark de Politiques Publiques en Allemagne, Etats-Unis, Japon et Italie*, Mars 2015

- Néanmoins, compte tenu du contexte de récente libéralisation du marché de l'électricité, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de mécanisme de marché permettant une valorisation « explicite » de capacités d'effacement électriques. Les capacités d'effacement sont aujourd'hui valorisées par deux principaux mécanismes de soutien gérés directement par les opérateurs historiques (un mécanisme équivalent au système d'« interruptibilité » français et un mécanisme d'effacement « planifié » lors de l'été), et plus marginalement, par la mise en place de démonstrateurs réalisés notamment dans le cadre de projets « Smart City » développés par le gouvernement depuis 2012.
- Bien que le développement des capacités d'effacement soit récent, les opérateurs historiques communiquaient en 2014 sur ~10 GW d'effacement au Japon, principalement assurés par des groupes électrogènes. Les démonstrateurs ne représentant que quelques dizaines de MW au Japon, ces 10 GW de capacités sont valorisés principalement sur les deux mécanismes (« interruptibilité » et contrats planifiés), et seraient également répartis entre les deux mécanismes selon les opérateurs.
- Par ailleurs, il est important de noter que le gouvernement a imposé post Fukushima (été 2011) des contraintes de consommation aux industriels (limitation des pics aux heures de pointe) qui ont permis de limiter de façon temporaire les black-out post extinction des centrales nucléaires japonaises. De même, suite à l'accident nucléaire, la plupart des climatisations ont vu leur consommation énormément réduite, dans le tertiaire comme l'industrie. Les incitations citoyennes ont également été fortes dans le résidentiel.

2.3.2.3. Mécanismes existants

- Concernant l'effacement, les mécanismes en place permettant de valoriser des capacités d'effacement sont principalement :
 - Les contrats dispatchables. Ils s'adressent aux clients industriels ayant une consommation importante qui sont rémunérés pour rendre disponibles des capacités d'effacement activables en très peu de temps en cas d'urgence et de risque majeur de déséquilibre sur le réseau électrique. Dans les faits, ils ne sont que très rarement activés par les opérateurs de réseaux (non dispatchés). Ce mécanisme peut s'apparenter aux contrats d'interruptibilité en France, avec néanmoins une rémunération *a priori* plus élevée que celle des contrats d'interruptibilité en France. En réalité, il semble s'agir plus d'un système de soutien aux industriels (subventions aux industriels) que les opérateurs sont incités à mettre en place par le gouvernement qu'un mécanisme correspondant à un réel besoin des opérateurs.
 - Les contrats planifiés d'interruption de la consommation sur les périodes de pointe en été. L'objectif du mécanisme est la réduction de la consommation tous les jours d'été de 13h à 17h. Cette valorisation des capacités d'effacements liées à ce mécanisme est réalisée via une tarification spécifique permettant une forte réduction des coûts réseaux payés par les consommateurs industriels et tertiaires, se traduisant par une réduction des factures les mois d'été. Ce principe de tarification de réduction des coûts en fonction des consommations à la pointe existait déjà avant Fukushima mais a été très largement étendu après Fukushima par les opérateurs historiques qui y ont été incités pour faire face à l'arrêt des centrales nucléaires afin de passer les pointes de consommation. La majorité des capacités d'effacements valorisées via ce mécanisme sont en réalité aujourd'hui constitués de capacités de production locales (groupes électrogènes) utilisées par les industriels. En effet, le niveau de rémunération permis par ces contrats est très élevé et suffisant pour inciter certaines entreprises à utiliser leurs groupes tous les jours d'été de 13 h à 17 h. Cependant, ce mécanisme est très critiqué aujourd'hui car il coûte très cher aux opérateurs et a de moins en moins d'intérêt car la tension sur l'équilibre offre-demande diminue.

- Le type d'effacement privilégié par les participants actuels à ces formes d'effacement est principalement lié à de l'autoconsommation avec des groupes générateurs diesel. En effet, les prix de l'électricité sont élevés au Japon, ce qui a pu inciter de nombreux industriels à s'équiper en groupes électrogènes. Sur les contrats planifiés, on observe également un effacement planifié de certains industriels qui choisissent de ne produire que la nuit et le matin en été.

2.3.2.4. Démonstrateurs

- Par ailleurs, soutenus par le fonds de financement du METI, des groupements d'acteurs intégrant des compagnies d'électricité, des équipementiers et des opérateurs d'effacement, ont lancé des démonstrateurs capables de piloter des capacités d'effacement.
 - En 2013, EnergyPool (alors dissocié de Schneider Electric), Schneider Electric, Sojitz et TEPCO ont notamment lancé un projet d'effacement industriel : le projet iDR (*industrial Demand Response*). TEPCO est la principale compagnie d'électricité japonaise, située à Tokyo, Sojitz développe des actifs de production décentralisée (fossiles et renouvelables). Le projet vise à équilibrer le réseau de TEPCO pendant les périodes de pics de consommation électrique, à sécuriser l'approvisionnement en cas de panne soudaine d'une centrale de production et à équilibrer la production intermittente renouvelable. Le portefeuille d'effacement est de 50 MW en agrégeant une dizaine d'industriels alimentés par Tepco, portefeuille piloté depuis un centre d'opérations à Tokyo.
 - De même, en 2013 EnerNOC Japan a lancé avec TEPCO un démonstrateur d'effacement. Ces projets sont subventionnés à 100% en ce qui concerne les coûts d'installation chez les consommateurs dans la plupart des cas, mais les coûts engendrés par les opérateurs ne sont souvent couverts qu'en partie, ce qui rend la rentabilité compliquée pour les opérateurs.
- Il convient de noter que la capacité totale d'effacement exploitée via ces démonstrateurs est de l'ordre de grandeur de quelques dizaines de MW au Japon, soit très faible par rapport aux capacités valorisées sur les mécanismes implicites.

2.3.2.5. Développements et évolutions

- De nombreux acteurs (hors opérateurs historiques) poussent le développement de davantage de capacités d'effacement pour flexibiliser les réseaux japonais. De nombreux chantiers sont à l'étude au Japon actuellement pour développer des mécanismes explicites de valorisation des effacements : réflexions sur la mise en place d'un mécanisme d'ajustement afin d'équilibrer le réseau en temps réel auquel l'effacement pourrait participer, discussions autour d'appels d'offres effacement entre les TSOs ou au sein de chaque TSO (via l'organisme inter-régional OCCTO qui pourrait avoir des prérogatives d'équilibrage et dont la mise en place pourrait être un levier de développement de davantage de capacités d'effacement), de la participation de l'effacement au marché spot ou de la mise en place d'un marché de capacité. On constate donc que les initiatives de développement sont nombreuses mais à l'heure actuelle aucun mécanisme n'a été concrètement développé. Le METI compte cependant mettre en place un de ces mécanismes à horizon 2017.

2.3.2.6. Principales différences avec la France

- Il apparaît qu'au Japon la préoccupation concernant le développement de l'effacement est plus récente qu'en France puisqu'elle fait suite à l'accident de Fukushima en 2011.
- Par ailleurs, on a une participation nettement moins importante des effacements au Japon car le cadre réglementaire et les mécanismes en place sont moins avancés qu'en France (en termes de régulation, de nombre de mécanismes permettant de valoriser l'effacement).
- Un point clé au Japon est la forte mobilisation citoyenne pour limiter les pics de consommation sur le réseau.
- Les effacements actuellement valorisés sont principalement des effacements liés à de l'autoproduction grâce à un générateur diesel.

2.3.3. Etats Unis – PJM & CAISO

2.3.3.1. PJM Interconnection

PJM Interconnection (PJM) est une *Regional Transmission Organization* (RTO) qui, comme les Gestionnaires de Réseaux de Transport (GRT) européens tel que RTE, coordonne, contrôle et surveille son réseau de transmission électrique. PJM dessert 13 états et le district de Columbia et coordonne actuellement le plus important marché de gros de l'électricité au monde. Avec plus de 900 entreprises membres, PJM dessert 61 millions de clients (+ de 19% de la population des USA) et détient 183 GW de capacité de production.

Contrairement à la France dont la problématique réside principalement dans la gestion de la pointe hivernale, **la demande sur le marché PJM présente deux pics principaux (« *dual peaking system* ») en été et en hiver**. Le pic d'été est causé par les systèmes de climatisation avec un pic journalier en fin d'après-midi et début de soirée. Le pic d'hiver est lié aux installations de chauffage avec un pic journalier le matin.

Pour pallier cette problématique de pics de consommation, le gestionnaire du réseau PJM développe, depuis le début des années 2000, des capacités d'effacement de consommation et les mécanismes de valorisations permettant leur développement. En effet, l'analyse du marché PJM montre que, avec un cumul de ~11 GW valorisés, le développement de capacités d'effacement sur ce marché est déjà bien avancé et les principales caractéristiques de ces marchés de l'effacement peuvent être résumées par les points suivants :

- **PJM a été un des précurseurs du développement des mécanismes de marchés permettant la valorisation de capacités « explicites » d'effacement de consommation** (par opposition aux effacements tarifaires pouvant être qualifiés d'« implicites » : incitation tarifaire à s'effacer). En effet, PJM opère des capacités d'effacement depuis 2000 lorsqu'il a initié un programme pilote de rémunération d'interruptions de consommation dans des conditions d'urgence (type interruptibilité), par la suite appelé « *Interruptible Load for Reliability* ». Depuis 2007, PJM a notamment mis en place un cadre réglementaire permettant la participation des effacements aux services d'équilibrage et aux marchés de l'énergie mais la croissance des capacités d'effacement a principalement été soutenue par la mise en place du marché de capacité. PJM a en effet développé les mécanismes favorables à la participation de l'effacement, dont les règles évoluent. A l'heure actuelle, la majorité (~90%) des revenus de l'effacement sont générés sur le marché de capacité qui intègre aujourd'hui la quasi-totalité des capacités d'effacement (~11 GW valorisés pour l'année de livraison 2016/2017²², soit ~7% de la capacité totale de 160 GW requise par PJM)

²² PJM - Demand Response 2016 Activity Report

- **Un marché de capacité mature, intégrant toutes les capacités d'effacement, en constante évolution, générant une grande partie des revenus des capacités d'effacement.**

- En effet, PJM a développé un des premiers marchés de capacité en 2007 et l'intégration des capacités d'effacement a été mise en place dès 2000 (avec le service d'*Interruptible Load for Reliability*). Aujourd'hui, les mécanismes hors marché de capacité ont disparu (*Interruptible Load for Reliability*, équivalent de l'interruptibilité) et 95% des revenus des capacités d'effacement proviennent de la rémunération de capacité marché.
- Par ailleurs, les premières années de mise en place du marché de capacité ont été favorables à l'intégration de capacités d'effacement rémunérées avec des contraintes de participation spécifiques (plages de disponibilité et fréquence d'activation adaptées à l'effacement de consommation aux Etats-Unis) et PJM cherche aujourd'hui à adapter les contraintes de participation de l'effacement afin de répondre à des besoins de capacité du système : des produits d'effacement de « plus haute qualité » (avec des plages de disponibilité plus larges, plus proches de la disponibilité des capacités de production) sont de plus en plus privilégiés par l'opérateur du système.

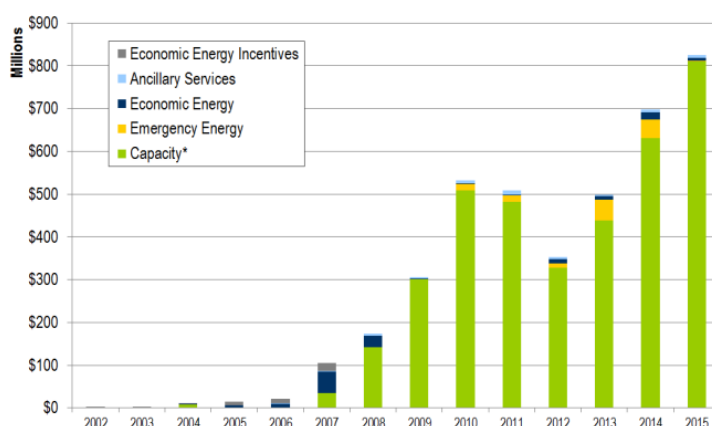


Figure 13 : Revenus annuels générés par les effacements par marché [M\$]

- **Une participation significative des effacements tertiaire et résidentiel.** PJM est caractérisé par un développement important des capacités d'effacement sur le tertiaire (public et privé) ainsi que sur le résidentiel. Ce développement est nettement supérieur aux types d'effacement que l'on trouve en France. En effet, le secteur industriel représente ~50% des capacités d'effacement pour les capacités sécurisées pour l'année de livraison 2015/2016, le résidentiel représente ~15%, le tertiaire public et privé majoritairement le reste (~36%). Cependant, il convient de mentionner que ces chiffres incluent à la fois de l'effacement process et de l'effacement accompagné d'autoconsommation avec des groupes diesel (qui représentent ~23% des capacités d'effacement sur le marché de capacité).

Cette intégration plus importante du diffus et du tertiaire peut être expliquée par une intégration d'effacement chez les utilities qui intègrent l'effacement à leur offre de fourniture ; pour exemples de programmes d'effacement organisés par les utilities, Appalachian Power, filiale d'American Electric Power servant l'ouest de la Virginie, propose à ses clients tertiaires deux programmes (un programme d'Economic DR et un d'Emergency DR) que la utility utilise afin de participer aux programmes de PJM. La souplesse de PJM sur le contrôle du réalisé est également un facteur d'intégration des capacités d'effacement tertiaire et résidentiel.

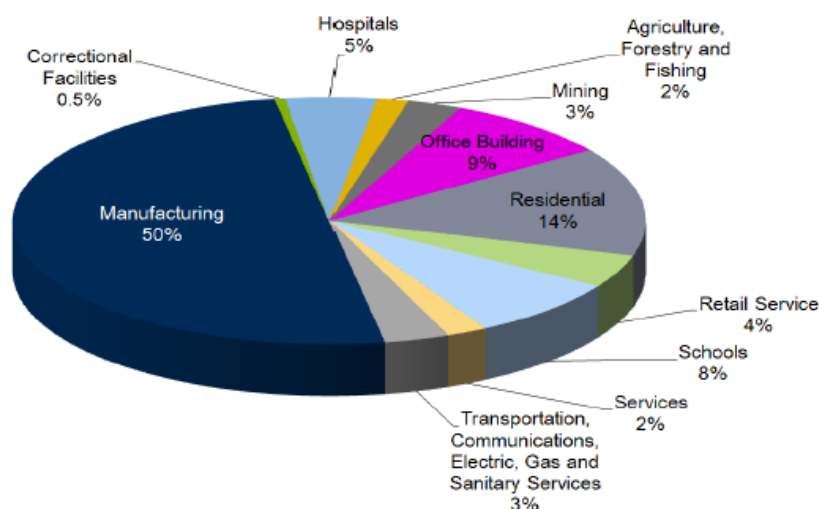


Figure 14: Capacités confirmées pour l'année de livraison 2015/2016 par segment d'activité [Capacity market]

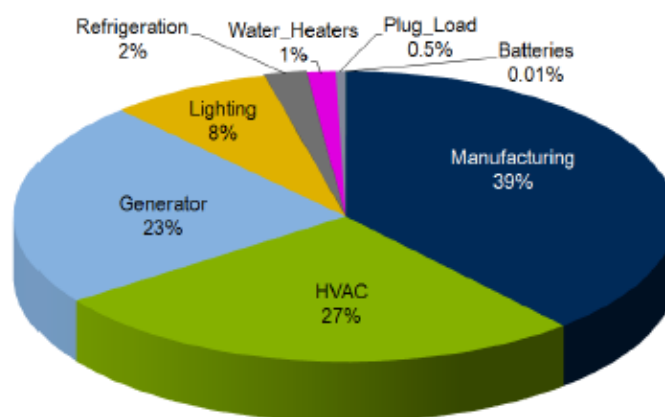


Figure 15 : Capacités confirmées pour l'année de livraison 2015/2016 par type d'effacement ou usage effacé [Capacity market]

- **Une participation significative des effacements aux réserves primaire et secondaire** : La constitution des réserves primaire et secondaire est ouverte à la participation des effacements et on a notamment ~25% de la *Regulation* ouverte aux capacités d'effacement.

A l'image du marché de capacité développé il y a environ 10 ans, et qui a permis le développement des mécanismes explicites de valorisation des effacements de façon anticipée par rapport à la France, les capacités d'effacement sont aussi valorisées et développées sur les *Reserves* et la *Regulation* depuis un certain temps, avec succès. Par ailleurs, en avance également sur les évolutions réglementaires en France, le système mis en place pour contractualiser les réserves primaire et secondaire sur PJM est déjà un marché (en France, les réserves primaire et secondaire sont assurées par un mécanisme d'obligations des producteurs et doit évoluer vers un mécanisme de marché), rémunéré en 2016 à 15,7\$/MWh pour la *Regulation* et 3,6\$/MWh pour la *Reserve*. En 2014, les capacités d'effacement représentent ~15% des 600 MW de capacités participant aux *Reserves* (soit ~90 MW), et ~25% des 525 à 700 MW de capacités participant à la *Regulation* (soit ~150 MW)²³.

Les capacités d'effacement qui participent à la *Regulation* sont principalement des chauffe-eau électriques (45%) pour les capacités d'effacement process, sur l'autoconsommation on a ~37% sur les générateurs diesel et les batteries (Cf Figure 16).

²³ National Grid & Baringa – DSR Incentives in international markets 2015

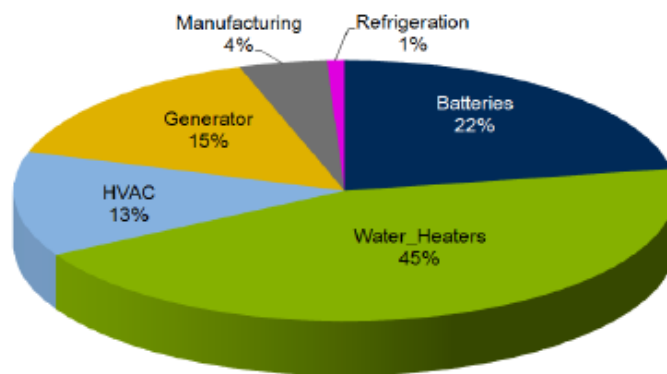


Figure 16 : Participation à la Regulation par type d'effacement ou usage effacé en 2016

Types d'effacement

PJM segmente ces types d'effacement en deux grandes catégories :

- « Economique » (*Economic Demand Response*) – réponse à un signal prix du marché : l'activation ne se fait que si le prix marginal localisé²⁴ de l'énergie est supérieur ou égal à un prix seuil garantissant une rentabilité positive de l'activation pour les consommateurs finaux (*Net benefit price*). Ce type d'effacement participe aux marchés énergie, ainsi qu'aux capacités de réserves permettant l'équilibrage du réseau par PJM.
- « D'urgence » (*Emergency Demand Response*) – réponse à un besoin de capacité : Le participant s'engage à diminuer sa consommation sur la base des capacités valorisées sur le marché de capacité sur demande de PJM en ayant préalablement obtenu des capacités aux enchères du marché de capacité tel que présenté plus loin.

Marché de capacité

Le marché de capacité a été créé en 2007 (*Reliability Pricing Model*) afin d'assurer l'approvisionnement du système en vue de faire face aux besoins de consommation pour les années à venir. Ce marché a, de même qu'en France aujourd'hui, permis la participation de l'effacement dès les premières années. Ce marché est organisé autour d'enchères débutant 3 ans avant l'année de livraison avec une enchère initiale « *Base Residual Auction* », suivie de trois enchères secondaires « *Incremental Auctions* » à mesure que l'année de livraison s'approche.

²⁴ Sur PJM comme sur certains autres marchés américains, il n'y a pas un unique prix du marché énergie à un instant t mais plusieurs prix de marché dépendant des zones géographiques au sein du marché PJM

Depuis 2012/2013 (année de livraison) l'ensemble des capacités d'effacement participe au marché de capacité, l'«*Interruptible Load for Reliability programme*» (ancien programme de valorisation des effacements) ayant disparu avec la mise en place du marché de capacité. La capacité totale d'effacement proposée sur le marché de capacité a donc augmenté significativement (de 4 GW en 2008/2009 à 20 GW en 2014/2015 en incluant les capacités non retenues à l'enchère, soit une croissance annuelle moyenne de 30%) grâce à une rémunération attractive associée à des contraintes d'activation faibles. Cette baisse du *clearing price*²⁵ de l'enchère a donc fait baisser les paiements de la capacité tant pour les capacités de production que d'effacement (Cf Figure 18, année 2012/2013 prix RTO passage de 110\$/MW/jour à 17\$/MW/jour entre 2011/2012 et 2012/2013). Au-delà de la baisse des prix des enchères du marché de capacité, ses règles du marché de capacité autorisaient les capacités d'effacement à n'être disponibles qu'à certaines heures de l'été et pour un nombre d'activations limité contrairement aux capacités de production. Ces restrictions particulières peuvent en effet être un risque pour le système si ces capacités d'effacement représentent une part importante de la capacité sécurisée par PJM : hors des heures de disponibilité de l'effacement, les capacités peuvent devenir trop limitées. Par ailleurs, PJM a rencontré des soucis lors de l'activation de certaines capacités d'effacement.

Pour pallier ces problèmes, PJM a décidé de renforcer les contraintes imposées aux capacités d'effacement valorisées sur le marché de capacité et a notamment mis en place trois produits distincts d'effacement :

- *Limited Demand Response (Limited DR)* : l'effacement tel que présent lors des années précédentes (disponibilité de Juin à Septembre, les jours ouvrés entre 12h et 20h, avec un nombre limité d'activations, pour des activations de 6h consécutives maximum)
- *Extended Summer Demand Response (Extended Summer DR)* : la capacité doit être disponible pendant une période estivale plus étendue (de Mai à Octobre inclus) entre 10h et 22h avec un nombre d'activations illimité, pour des activations de 10h consécutives maximum
- *Annual Demand Response (Annual DR)* : la capacité doit être disponible toute l'année (pendant la période estivale (entre Mai et Octobre inclus) entre 10h et 22h et pendant la période hivernale (Novembre à Avril) entre 6h et 21h) avec un nombre d'activations illimité, pour des activations de 10h consécutives maximum

Ainsi, l'*Extended Summer DR* et l'*Annual DR* sont des produits de «plus haute qualité» pour le système car la capacité est disponible et activable de façon plus similaire à des capacités de production. PJM cherche donc à privilégier ces produits sur le marché de capacité : entre 2014/2015 et 2016/2017, PJM a mis en place un minimum sur la capacité d'*Extended Summer DR + Annual DR*, minimum remplacé à partir de 2017/2018 par un maximum sur la capacité de *Limited DR + Extended Summer DR* (limité à 9% pour l'année de livraison 2017/2018). Afin de mettre en place ces limites, PJM rémunère moins que les capacités de production les effacements *Limited DR* contrairement à l'*Annual DR* et *Extended Summer DR*, rémunérées comme les capacités de production (par exemple pour l'année de livraison 2016/2017 sur l'enchère initiale *Annual* et *Extended Summer DR* sont à 136\$/MW/jour et la *Limited DR* à 118,5\$/MW/jour. Source : PJM).

Aujourd'hui, PJM cherche à nouveau à faire évoluer ses produits d'effacement afin de couvrir ses besoins : les trois produits présentés précédemment sont remplacés par deux nouvelles catégories à partir de l'année de livraison 2018/2019 (enchère initiale en 2015/2016) : la *Base Capacity Demand Resource* (BCDR), équivalente à la *Limited DR* et l'*Extended Summer DR*, et la *Capacity Performance Demand Resource* (CPDR) plus proche de l'*Annual DR*. À terme, l'objectif est de réduire le volume de Base DR pour privilégier les capacités d'effacement d'une « plus grande qualité » (pour le réseau) en rémunérant moins la Base DR (pour l'année de

²⁵ Prix maximal à payer (€/MW) par l'opérateur système à l'ensemble des capacités retenues pour sécuriser la capacité nécessaire à passer les pointes de consommation. Prix de l'issue de l'enchère

livraison 2018/2019, la *Capacity Performance DR* est rémunérée à 164\$/MW/jour contre 150\$/MW/jour sur la *Base DR*).

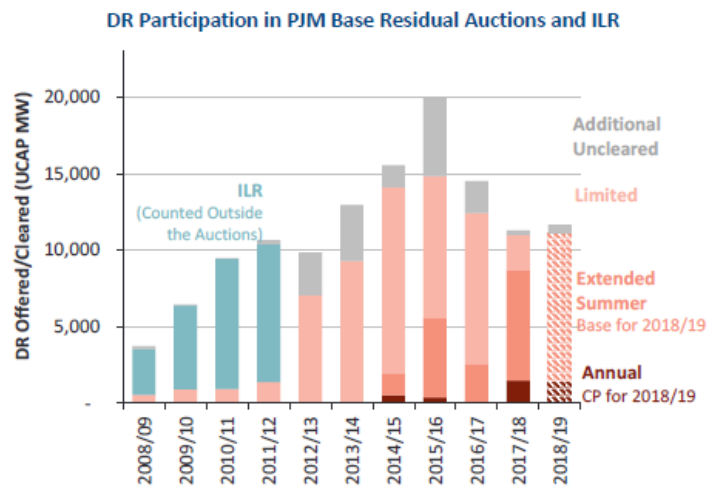


Figure 17: Participation des effacements aux BRA et ILR [Années de livraison : 2008 à 2019]

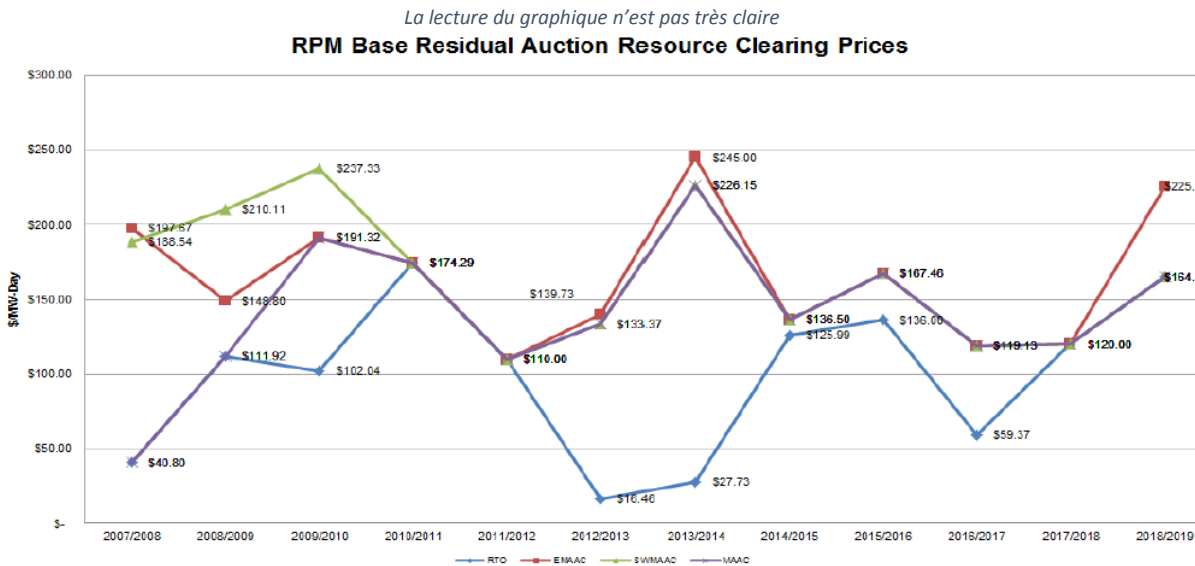


Figure 18 : Clearing prices des enchères initiales pour les années de livraison 2007/2008 à 2019/2020 par zone

2.3.3.2. California Independent System Operator (CAISO)

California Independent System Operator (CAISO) est l'opérateur de système indépendant qui gère le système électrique, les lignes de transmission et le marché électrique en Californie. CAISO est opérateur du système électrique pour 80% du territoire californien et une partie du Nevada, et est donc une « *balancing authority* » pour son périmètre de gestion, c'est-à-dire qu'il est en charge de l'équilibrage entre production et consommation sur le réseau de transmission et du maintien de la fréquence du réseau. Cependant, CAISO n'est que l'opérateur du système et ne gère pas les réseaux de distribution qui sont gérés localement par des utilities différentes. Il est donc intéressant de comprendre la valorisation des effacements sur un marché présentant un *market design* différent du marché français (opérateur système indépendant du gestionnaire du réseau de transport d'électricité, utilities locales intégrant transport et distribution et gérant la majeure partie de l'effacement à l'heure actuelle, part importante d'effacement tertiaire et résidentiel)

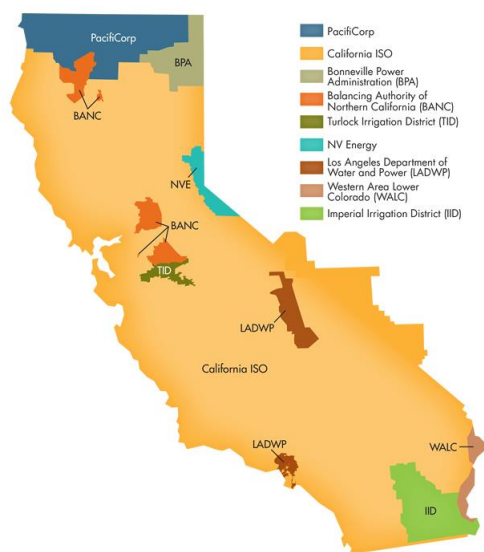


Figure 19: Périmètre CAISO

Historiquement, depuis 1998, le système exploitait des capacités d'effacement de la société distribuant l'eau en Californie *California Water Service*. Ces capacités étaient principalement de l'effacement sur les pompes en amont ou aval de volumes de stockage.

On constate que les mécanismes explicites de participation des effacements sur le périmètre CAISO sont aujourd'hui moins avancés qu'en France, la valorisation des effacements s'étant développée plutôt au niveau des utilities locales que de l'opérateur du système. Les trois utilities locales californiennes régulées par la CPUC (South California Edison, Pacific Gas & Electric, San Diego Gas & Electric) sont à la fois fournisseurs d'électricité, transporteurs et distributeurs puisqu'elles possèdent et opèrent les lignes de transmission et de distribution, et cet écart avec la France peut expliquer que les utilities gèrent plus de capacités d'effacement qu'en France.

- **Les capacités d'effacement sont aujourd'hui principalement gérées par les utilities.** Aujourd'hui, l'effacement en Californie est majoritairement géré au niveau des utilities locales (South California Edison, Pacific Gas & Electric, San Diego Gas & Electric) qui opèrent des programmes d'effacement propres sur lesquelles CAISO a peu de visibilité. Les trois utilities proposent en effet des programmes (de 10 à 20 programmes par utility environ) pour les clients industriels, tertiaires et résidentiels (en ciblant uniquement, pour les clients résidentiels, ceux équipés d'air conditionné central). PG&E et SCE proposent à la fois des programmes à incitation tarifaire et interruptibles sur signal d'activation alors que SDG&E propose uniquement des programmes à incitation tarifaire.

Au total, en 2015, ~2 GW sont valorisés sur ces programmes chaque mois (dont ~700 MW pour PG&E, ~90 MW pour SDG&E et ~1,1 GW pour SCE)²⁶. (Voir Exemples de programmes d'effacement sur Pacific Gas & Electric)

En revanche, contrairement au marché français sur lequel la majorité des mécanismes de valorisation des capacités d'effacement est aujourd'hui organisée par le gestionnaire de réseau RTE, l'opérateur du système CAISO n'a de vision que sur une partie de l'effacement opéré sur son système car l'effacement s'organise principalement au sein des utilities locales en Californie (principalement South California Edison, Pacific Gas & Electric, San Diego Gas & Electric). Cependant, l'opérateur du système et la *California Public Utility Commission* (CPUC, équivalent de la Commission de Régulation de l'Energie à la maille de l'état Californien) ont confirmé leur volonté d'intégrer rapidement la totalité des capacités d'effacement dans des programmes appropriés sur les marchés énergie. Ce basculement doit en effet avoir lieu à horizon 2018 et la transition est opérée grâce à des enchères de capacité d'effacement organisées par la CPUC, le *Demand Response Auction Mechanism* (expliqué plus loin).

Depuis 2010, les opérateurs d'effacement, agrégateurs (type : EnerNOC) et consommateurs industriels et tertiaire peuvent directement engager leurs capacités d'effacement auprès de CAISO sans passer par les programmes des utilities, cependant les volumes observés restent faibles. Aujourd'hui, l'objectif principal est de créer un marché géré par CAISO intégrant l'ensemble des capacités d'effacement afin, à terme, de piloter directement la participation de la totalité des effacements sur son système en particulier pour les capacités actuellement gérées par les utilities au sein de leurs programmes propres.

- **Absence de marché de capacité sur CAISO.** Contrairement à la France qui est en train de mettre en place un marché de capacité formalisé ou à PJM qui a mis en place en 2007 un marché de capacité ouvert à la participation des effacements, CAISO n'a pas de marché de capacité regroupant l'ensemble des capacités disponibles. Cependant, une enchère de capacité est organisée par l'opérateur du système (*Demand Response Auction Mechanism*) pour la contractualisation de capacités hors des périmètres des programmes des utilities dans le but à terme d'intégrer les programmes d'effacement des utilities directement sur les marchés. Cette enchère devrait rester un programme de transition afin d'intégrer l'effacement aux marchés. L'objectif de cette enchère annuelle est de rémunérer et développer la contractualisation des capacités d'effacement en dehors des périmètres des programmes des utilities, et proposées par des participants indépendants (*Direct Access Customers* qui sont des agrégateurs ou industriels) sur le marché énergie CAISO. Par ailleurs pendant ces années de transition, les utilities participent à cette enchère capacitaire avec des portions de leurs programmes propres d'effacement.
- **L'effacement ne participe pas à l'équilibrage en fréquence.** Concernant les services permettant à CAISO d'équilibrer son système en temps réel, l'effacement peut participer aux réserves tertiaires (*Reserve*), mais actuellement pas aux réserves primaires et secondaires (*Regulation*) contrairement à la France où RTE met en place la participation des effacements aux réserves primaire et secondaire ou à PJM qui a déjà ouvert le marché de la constitution des réserves primaire et secondaire à l'effacement.

Types d'effacement

De même que PJM, CAISO présente deux types de produits d'effacement : un effacement « économique » (*Proxy Demand Resource*) et d'« urgence » (*Reliability Demand Response Resource*)

- La *Proxy Demand Resource* (PDR) est un modèle de participation de l'effacement aux marchés énergie et aux services d'équilibrage introduit par CAISO en 2010.
- La *Reliability Demand Response Resource* (RDRR) est un produit créé en 2014 pour développer davantage la participation de l'effacement aux marchés. Ce produit facilite l'intégration de capacités d'effacement capables de réagir à un signal émis par le système en cas de besoin de davantage de

²⁶ PG&E, SDG&E et SCE 2015 monthly demand response programs, CPUC

capacité de production (ou d'une diminution de la consommation) que ce soit de façon automatisée (asservissements à certaines caractéristiques du système) ou non. La RDRR peut participer aux marchés énergie (*Day Ahead* et *Real Time*) de la même façon qu'une capacité de production ; cependant elle ne peut pas participer aux marchés des services d'équilibrage.

Exemples de programmes d'effacement chez Pacific Gas & Electric

- **Réduction de consommation sur signal du réseau : *Smart AC – Residential***

Le programme Smart AC de PG&E consiste en l'installation, chez les clients PG&E résidentiels éligibles d'un équipement de pilotage de l'air conditionné central afin de pouvoir limiter la pointe de consommation électrique liée aux climatisations en été (entre Mai et Octobre). Les clients sont éligibles s'ils possèdent un dispositif central de climatisation, s'ils sont propriétaires (ou ont une autorisation du propriétaire de participer au programme Smart AC) et s'ils n'ont pas de problème de santé grave.

Les activations sont automatisées et ne requièrent aucun pilotage de la part des clients résidentiels qui sont rémunérés 50\$ à l'installation de l'équipement de pilotage pour leur participation au programme Smart AC. PG&E communique sur le fait que le programme n'a pas pour effet de réduire la facture électrique des consommateurs, le seul revenu étant la rémunération initiale de 50\$, et ne communique pas sur un nombre maximal d'activations.

- **Programmes à incitation tarifaire à l'effacement : *PDP – Peak Day Pricing***

PG&E propose aux consommateurs tertiaires un programme d'effacement via une incitation tarifaire : sur une base de tarifs fixes ou Peak/Off peak, PG&E réduit les tarifs (fixes ou peak) sur la période d'été en contrepartie de la possibilité de les augmenter fortement sur la période 14h-18h sur les *Peak Event Days* (9 à 15 jours dans l'année) qui sont des jours sur lesquels CAISO relève de forts pics de consommation.

Les consommateurs sont donc incités à éviter les consommations électriques superflues les jours de *Peak Event* puisque les tarifs Peak sont multipliés par ~3,5 entre 14h et 18h. Le programme ne concerne donc pas directement un usage particulier, tous les usages ont intérêt à être limités.

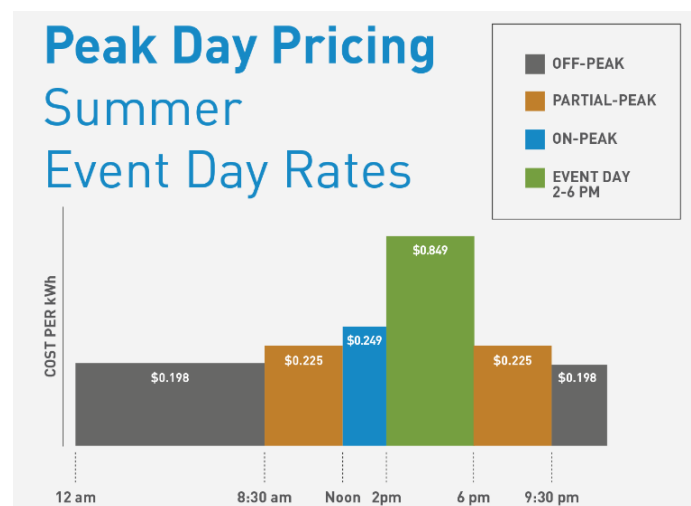
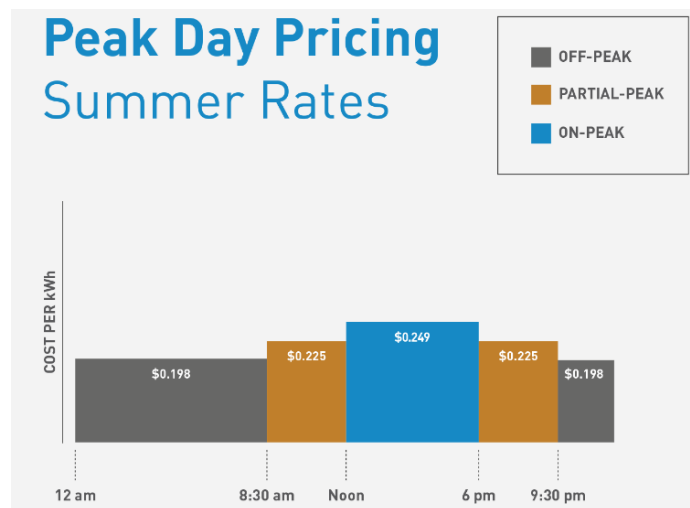


Figure 20 : Comparaison des tarifs entre un Peak Day Event et un jour d'été sans Peak

2.4. Synthèse comparative des cadres de valorisation des effacements en France et à l'international

SYNTHÈSE DES CADRES RÉGLEMENTAIRES DE VALORISATION DES PAYS ANALYSÉS

Pays	Gestion centralisée	Réserves tertiaires	Réserves 1aires/2ndaires	Marchés énergie	Mécanisme de capacité	Volumes valorisés	Evolutions attendues
FRANCE 		✓ RR et RC, AOE	✓ Services système	✓ NEBEF	✓ (2017)	~3,5 GW	- Mise en place du marché de capacité en 2017 - Contractualisation marché pour la réserve primaire
ROYAUME-UNI 	✓ 	✓ STOR	✓ Frequency Response	✗	✓ (2014)	~2 GW	Power Responsive Campaign : campagne de National Grid pour le développement des solutions de flexibilité dont l'effacement
PJM 	✓ 	✓ Reserves	✓ Regulation	✗	✓ (2007)	~11 GW	Règles de participation des effacements au marché de capacité plus contraignantes (disponibilité...)
CAISO 	✗ Décentralisé (utilities)	✓ Reserves	✗	✗	✗	Au total ~2 GW en 2015	Centralisation de la participation des effacements sur les marchés énergie à horizon 2018
JAPON 	n.a. 9 GRT régionaux	✗	✗	✗	✗	~10 GW	Mise en place d'un mécanisme marché explicite favorisant la valorisation des effacements

Figure 21 : Synthèse des cadres réglementaires de valorisation des effacements dans les pays analysés

L'analyse des mécanismes de valorisation des capacités d'effacement au Royaume-Uni, au Japon et aux Etats-Unis (PJM & CAISO) montre des **niveaux d'avancement réglementaires hétérogènes** (marché de capacité mature et en constante évolution réglementaire sur PJM, multiplicité des mécanismes de valorisation des effacements au Royaume-Uni et émergence de mécanismes dans un contexte de libéralisation récente du marché électrique au Japon). Dans ce panorama, la France est avancée en termes de réglementation, avec la participation des effacements aux marchés énergie via NEBEF, la participation des capacités d'effacement aux mécanismes d'équilibrage du réseau avec une ouverture récente à l'effacement sur la réserve primaire et enfin la mise en place en 2017 d'un marché de capacité ouvert à l'effacement. Par ailleurs, la France a été précurseur en termes de dynamique de valorisation de l'effacement car elle est un des premiers pays à avoir valorisé l'effacement, via les tarifs EJP et Tempo.

Les dynamiques d'intégration des capacités d'effacement au Royaume-Uni actuellement et sur PJM à la mise en place du marché de capacité montrent qu'en vue de favoriser le développement des capacités d'effacement, des **produits spécifiques, adaptés à l'effacement ou avec des règles de participation plus flexibles**, peuvent être développés : la *Demand Side Balancing Reserve* au Royaume-Uni, mécanisme dédié à l'effacement et peu contraignant pour les participants, la participation de capacités dissymétriques à la *Frequency Response* au Royaume-Uni ou la *Limited Demand Response* sur le marché de capacité PJM, capacité disponible uniquement l'été afin de permettre une participation des groupes de climatisation. Ces mécanismes spécifiques ou adaptés permettent de favoriser le développement de l'effacement grâce à des contraintes plus flexibles. Cependant, ces mécanismes et leurs règles de participation **doivent également pouvoir répondre au besoin de flexibilité** (le développement important de la *Limited DR* sur PJM a par exemple créé des déséquilibres sur le marché de capacité et conduit l'opérateur du système à revoir la définition des produits d'effacement afin de les rapprocher du besoin de capacités disponibles sur toute l'année) **et il apparaît intéressant que les mécanismes spécifiques ou adaptés à l'effacement soient limités en quantité.**

Les **types d'effacement** observés sont également variables.

- L'effacement en France (et au Royaume-Uni) est majoritairement industriel et tertiaire alors qu'il existe des géographies, comme les Etats-Unis avec CAISO et PJM, sur lesquelles l'effacement résidentiel est

plus développé, principalement via des programmes développés par les utilities locales auprès de leurs clients.

- L'effacement process par opposition à l'effacement ayant recours à des groupes de secours, est développé de façon hétérogène selon les géographies : 20% d'effacement process sur les effacements valorisés sur la *Short Term Operating Reserve*, réserve tertiaire au Royaume-Uni, en comparaison avec 50% sur les réserves rapides en France et sur l'appel d'offres effacement de RTE, 77% d'effacement process sur le marché de capacité PJM en 2015/2016. Par ailleurs, actuellement aucune des géographies étudiées n'a mis en place de mécanisme différencié en vue de favoriser un effacement process ou groupe électrogène.

3. Méthodologie d'estimation des gisements

Les gisements estimés sont de deux types :

- Le gisement technique : ce gisement correspond à une estimation du maximum de capacité techniquement effaçable sur les différents process effaçables à un instant t dans chaque secteur **hors contraintes économiques** (sans considération de rentabilité d'investissements nécessaires ou autres coûts de mise en œuvre). Sont considérés ici uniquement les process jugés effaçables et non une interruption totale de la consommation d'un site industriel ou tertiaire (une telle considération viendrait à considérer la puissance totale appelée comme le gisement technique lui-même). **Il s'agit d'un gisement théorique, l'estimation des coûts de mise en œuvre étant en réalité toujours prise en compte par les acteurs lors de la mise en place de capacités d'effacement.**
- Le gisement technico-économique : ce gisement correspond à une estimation de la puissance valorisable en fonction de la rémunération accordée à la puissance effaçable disponible : « quel gisement pour quel niveau de rémunération ». **L'estimation d'un gisement technico-économique est complexe car le gisement est lié à la fois à la puissance d'effacements disponible, aux paramètres techniques des effacements (délai de mobilisation, durée d'activation), et à la rémunération des effacements.** La rémunération de l'effacement est fortement corrélée aux paramètres techniques de l'effacement. Elle dépend d'autre part des contraintes organisationnelles que peuvent engendrer la mise en place d'effacements car sur les mécanismes par appels d'offres, les acteurs proposent des offres en relation avec leur estimation des coûts et contraintes organisationnelles de mise en place des effacements. Une vision actuelle (2016) de ces gisements est estimée dans un premier temps, ces gisements étant par la suite prolongés à plus long terme (horizon 2035)

L'estimation de ces gisements à la maille nationale consiste en une modélisation des puissances nationales potentiellement effaçables. Elle est réalisée sur la base des résultats des études de cas ainsi que sur des données nationales de consommation électrique nationale par secteur (industriel ou tertiaire) et par usage (données CEREN, 2013). Cette modélisation est réalisée sur un scénario de référence autour duquel sont définis des scénarios haut et bas permettant d'analyser la sensibilité des résultats aux différentes hypothèses de calcul. Les hypothèses de ces scénarios sont prises à la fois sur les paramètres permettant d'estimer le gisement technique et ceux permettant d'estimer le gisement technico-économique. Le scénario bas prend donc à la fois des hypothèses basses sur les parts effaçables de chacun des usages étudiés et des hypothèses économiques basses par rapport au scénario de référence et inversement pour le scénario haut.

3.1. Sources d'information

Réalisation des études de cas sur les secteurs de l'industrie et du tertiaire sélectionnés : entretiens spécifiques réalisés pour chacun des secteurs de l'industrie et les secteurs du tertiaire sélectionnés dans le cadre de cette étude (~30 entretiens réalisés au total) et entretiens spécifiques avec les principaux opérateurs d'effacement en France

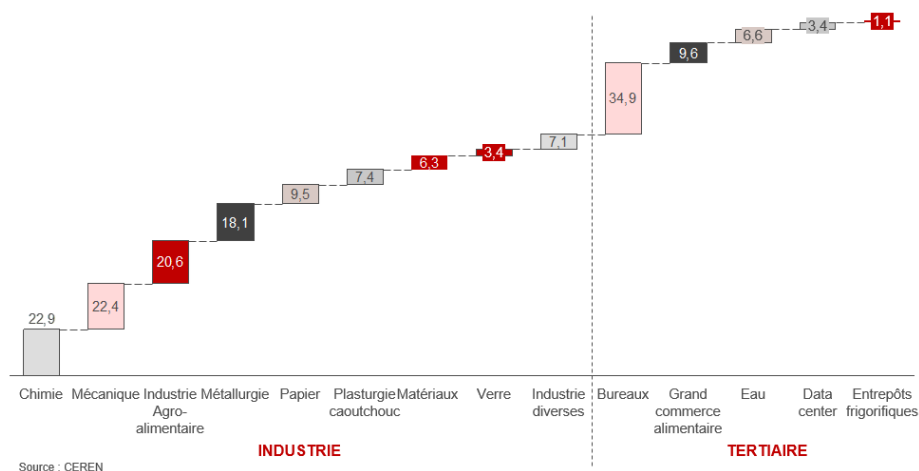


Figure 22 : Consommation électrique nationale des secteurs étudiés

Les études de cas couvrent l'ensemble des secteurs de l'industrie (métallurgie, mécanique, papier, chimie, agro-alimentaire, plasturgie, matériaux, verre et industries diverses) et les 5 secteurs du tertiaire sélectionnés (grand commerce alimentaire, entrepôts frigorifiques, bureaux, data center, traitement et distribution de l'eau).

Les études de cas ont été réalisées soit sur des sites industriels spécifiques (pour la majorité des études de cas sur l'industrie) soit avec une vision agrégée sur l'ensemble des sites d'une entreprise pour certains cas (pour les études de cas du secteur tertiaire et certains cas industriels).

Le profil des personnes interrogées est principalement celui de responsables énergie ou technique dans chacune des entreprises des secteurs concernés. Ces entretiens ont été préparés par l'envoi d'un guide d'entretien incluant des questions précises en amont d'un échange (téléphonique ou sur site). Ils ont été réalisés entre mai et juillet 2016 et ont porté sur : le détail des consommations électriques par usage du (ou des) sites, les courbes de charges, l'analyse des différents process de production, la participation aux différents mécanismes nationaux permettant de valoriser des effacements, les contraintes techniques et les coûts liés à la mise en place d'effacements, et la maturité de l'entreprise vis-à-vis du développement de capacités d'effacement de process.

Ainsi, pour la réalisation de ces « étude de cas », une trentaine d'établissements ou d'entreprises ont été interrogées (parfois plusieurs entreprises différentes par secteur, sélectionnées pour leur représentativité du secteur ou sur conseil des fédérations industrielles) et notamment :

	CAS D'ÉTUDE	ACTEURS RENCONTRÉS
INDUSTRIE	Métallurgie	- Trois acteurs majeurs de la sidérurgie (acier à l'oxygène, acier électrique, ferro-alliages) - Un acteur majeur de l'aluminium de première fusion - Un acteur majeur de la métallurgie Zinc
	Matériaux	Un cimentier
	Verre	Un site de production de verre creux
	Chimie	- Un producteur de chlore - Un producteur de gaz industriels - Un leader de la chimie fine - Un producteur de silicium - Un acteur de la chimie organique
	Mécanique	- Trois fonderies (2 importantes et une autre plus petite ; dont 2 proposés par la fédération) - Un acteur majeur de l'électronique
	Agro-alimentaire	Un acteur majeur du lait, un leader du malt, 2 industriels de la viande
	Papier	Un papetier intégré (proposé par la fédération) et un papetier standard
	Plasturgie et caoutchouc	2 plasturgistes dont un acteur majeur
	Industries diverses	Un producteur de panneaux de bois
TERTIAIRE	Grande distribution / entrepôts froid	Un acteur majeur du secteur de la grande distribution en France
	Traitement et distribution des eaux	Un opérateur majeur de réseaux de traitement et distribution des eaux
	Data centers	- Deux bureaux d'étude spécialisés dans la consommation énergétique des data centers - Un acteur industriel gérant des data centers en propre - Un hébergeur de données possédant et opérant des data centers en France

Figure 23 : Liste des acteurs rencontrés

Pour des raisons de confidentialité des informations obtenues, les entreprises prises en référence dans les études de cas ont été rendues anonymes.

Cette phase de réalisation des études de cas est une étape-clé et une des principales forces de la méthodologie de l'étude car elle a permis d'obtenir des informations les plus précises et concrètes possibles sur le potentiel d'effacement par modulation de process de chaque secteur via l'analyse de cas réels existants. Il a ainsi été possible d'évaluer pour chaque secteur, en fonction des réponses et du nombre de cas d'étude limités, les process effaçables ou non, sous quelles contraintes techniques et organisationnelles et à quel coût afin de caractériser au mieux les gisements sectoriels d'effacements par modulation de process.

Evaluation des gisements à la maille nationale :

- résultats des études de cas sectorielles (notamment informations de ratios de part effaçable par usage, contraintes techniques des effacements sur chacun des usages – entre autres durée maximale consécutive d'activation -, éléments de coûts d'activation des effacements) ;
- données de consommation nationales par secteur et par usage, et durée des puissances moyennes appelées (source CEREN 2013) ;
- répartition de la consommation nationale de chaque secteur par tranche de taille de site (source CEREN ; taille de site liée selon les secteurs à la puissance souscrite, la consommation annuelle d'électricité ou à la surface).

Pour une évaluation prospective : scénarios 2035 d'évolution de la consommation électrique par secteur issus des visions énergétiques de l'ADEME (vision 2035)

Partage et validation des hypothèses et résultats avec les différentes fédérations professionnelles présentes lors des Comités de pilotage.

3.2. Gisement technique

A partir des études de cas, l'estimation du gisement technique est réalisée secteur par secteur sur la base des consommations électriques par usage et par secteur (Source CEREN, année 2013). Afin d'obtenir une puissance effaçable à partir de la consommation annuelle par secteur, il convient d'estimer :

- la puissance appelée disponible lors des périodes de fonctionnement des installations (ou heures ouvrées), à partir de la consommation annuelle, sur la base des durées de fonctionnement annuelles des équipements de production ou les courbes de charge de fonctionnement des sites, réparties par usage
- et pour chaque « macro-usage » de l'électricité au sein du secteur, une fourchette de ratios de puissance effaçable²⁷ (une valeur de référence, et des sensibilités haute et basse) et des contraintes d'activation d'effacement (durée maximale d'effacement, capacité unitaire du site, délai de mobilisation nécessaire pour activer l'effacement) sont estimées grâce aux informations rassemblées et aux entretiens réalisés au cours des cas d'étude.

Ces différentes hypothèses sont explicitées en détail dans les études de cas sectorielles (voir 4.1 Détail des gisements et caractéristiques techniques des capacités d'effacement par secteur).

Afin de pouvoir participer à un mécanisme de valorisation d'effacement, une capacité doit pouvoir répondre aux contraintes techniques imposées dans les règles de participation à ce mécanisme entre autres durées minimale et maximale consécutives d'activation, délai de mobilisation, nombre maximum annuel d'activations, taille minimale pour participer. Les critères techniques clés (voir Figure 24) d'un effacement afin de déterminer s'il peut participer ou non à ce mécanisme seront parmi l'ensemble des critères : la puissance effaçable, le délai de mobilisation, durée minimale et maximale d'utilisation la répétitivité de l'effacement.

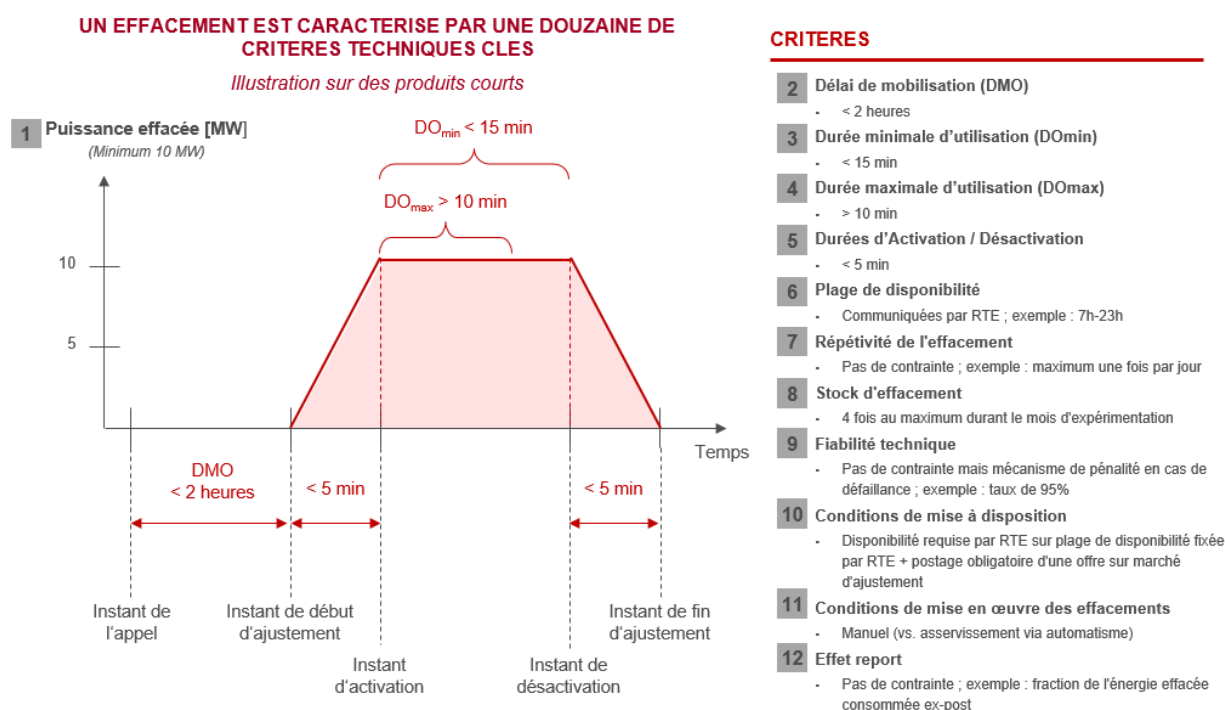


Figure 24 : Critères techniques clés d'un effacement

²⁷ Ratio de puissance effaçable = puissance effaçable sur l'usage / puissance totale appelée par l'usage

Le gisement de capacités d'effacement accessible est directement lié à chacun de ces paramètres.

Néanmoins, parmi ces paramètres, celui ayant le plus d'impact est la durée d'activation maximale d'un effacement car elle détermine un besoin de foisonner les capacités pour atteindre la durée d'activation requise. En effet, en vue de participer aux mécanismes nécessitant des durées d'activation plus longues, il sera nécessaire de foisonner les capacités d'effacement, c'est-à-dire d'activer les sites les uns après les autres afin de constituer un effacement maintenu plus longtemps selon le principe de cascado-cyclicité (Cf encadré page suivante) en tenant compte des potentiels reports et surconsommations ayant lieu directement après la période d'activation. Le fait d'avoir à activer plusieurs sites distincts pour réaliser un effacement d'une durée suffisante vient réduire le gisement potentiel de capacité effaçable pour cette durée.

Il a donc été choisi de n'utiliser (au-delà du paramètre économique) que le paramètre « durée » pour segmenter les gisements techniques et technico-économiques. Dans le cadre de cette étude, les gisements sont différenciés selon la durée maximale consécutive d'activation afin d'estimer les gisements d'effacement sur des courtes (30 minutes), moyennes (2h) et longues durées (8h) afin de répondre aux différents besoins du système électrique. Les durées (30 min, 2h, 8h) ont été choisies afin d'être représentatives des durées d'activation sur les mécanismes existants (réserves rapides pour les activations de courte durée, appel d'offres effacement pour la moyenne durée, mécanisme de capacité pour la longue durée). En effet, sur chacun des secteurs, les durées maximales d'activation sont propres aux process qui peuvent être effacés (ces maxima peuvent dépendre de l'organisation ou de l'ordonnancement des process de production ou de contraintes réglementaires -type réglementations sanitaires ou durées de travail salarié-, ou de confort).

Les autres contraintes techniques sont traitées de la manière suivante :

- La capacité minimale pour participer à un mécanisme est considérée comme une contrainte technique qui peut être levée en agrégeant les capacités (via des opérateurs/agrégateurs d'effacement)
- Les délais de préavis et nombre maximum annuel d'activation ont *aujourd'hui* un impact moindre par rapport à la durée d'activation. Ces contraintes techniques ne sont pas adressées dans le cadre de l'évaluation des gisements nationaux mais sont présentées dans le détail des fiches sectorielles de chaque secteur, en fonction des retours obtenus au cours des cas d'étude. Néanmoins, une forte périodicité des activations requises pourrait être un frein supplémentaire à la participation des industriels qui pourraient de fait avoir des pertes production significatives.

Ainsi, pour chaque secteur et usage donnés, il est possible d'obtenir une estimation du gisement technique d'effacement (pour trois durées distinctes d'effacement : 30 minutes, 2h, 8h) (voir Figure 25).

Définition du report et de la surconsommation suite à l'activation d'un effacement

L'effet **report** représente le décalage dans le temps de la consommation non réalisée lors de l'effacement. Il est compris entre 0 et 100% de la consommation effacée sur une période d'activation et peut avoir lieu après l'activation (immédiatement après comme pour le chauffage ou la climatisation par exemple, ou décalé plus tard dans le temps pour un rattrapage de production dans l'industrie qui pourrait avoir lieu quelques jours après l'activation de l'effacement) ou être anticipé avant l'activation (par exemple une stratégie de sur-refroidissement de stockages froid (diminution de la température volontaire) avant un arrêt des groupes de production de froid).

La **surconsommation** (ou effet rebond) représente une consommation supplémentaire (en plus du rattrapage de la consommation rattrapée, effet report) qui peut être engendrée par l'activation d'un effacement. Cette surconsommation peut être liée par exemple à un rendement plus faible suite à un effacement, pour remonter rapidement à une température de consigne.

Principe de cascado-cyclicité et foisonnement des effacements

Certains process ne peuvent être effacés de façon consécutive que pendant de courtes durées (ex : froid, chauffage, climatisation, pompes dans le secteur de l'eau). Ainsi, afin de participer à des mécanismes nécessitant des durées d'activation consécutives plus longues, il sera nécessaire d'activer à la suite plusieurs sites (ou plusieurs équipements d'un même site) pour assurer une activation continue sur la durée requise. Cette activation de différents équipements tour à tour est le **pilotage par cascado-cyclicité**.

La nécessité de piloter des effacements par cascado-cyclicité a pour effet de **diminuer le gisement technique pour un usage donné**. A titre d'exemple, s'il est nécessaire d'activer par cascado-cyclicité 3 sites d'un secteur pour participer à un mécanisme, le gisement maximal pour ce secteur sur le mécanisme en question sera divisé par 3 par rapport à un gisement technique estimé sur une durée plus courte qui correspondrait à la durée maximale d'effacement par site.

Si, pour un secteur et un usage donné, un effet report a lieu immédiatement après l'activation de l'effacement sur un site et que la durée nécessaire d'activation est supérieure à la durée maximale consécutive d'activation de cet usage, il faudra activer davantage de sites afin de compenser les sites qui seront en cours de report (rattrapage de consommation) pendant la durée d'activation requise. C'est notamment le cas pour les usages thermiques dans le tertiaire (chauffage, froid et climatisation).

La gestion cascado-cyclique des sites et/ou équipements effacés sur les différents sites est le plus souvent gérée et optimisée par l'opérateur d'effacement.

ILLUSTRATION DE LA METHODOLOGIE : Gisement technique pour le grand commerce alimentaire

Grand commerce alimentaire : gisements techniques à court, moyen et long termes (0,5h, 2h, 8h) [GW]

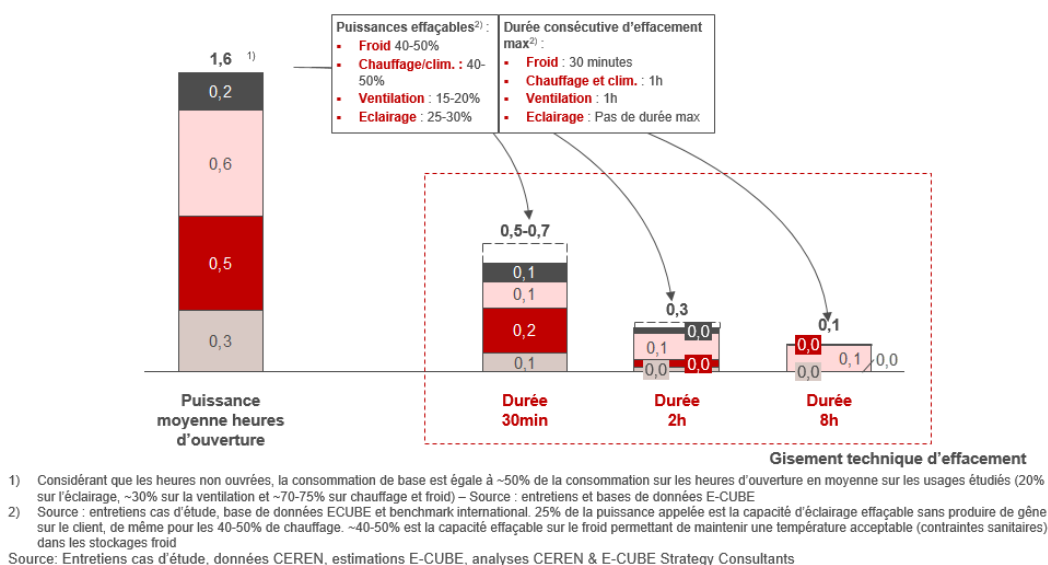


Figure 25 : Illustration de la méthodologie : estimation du gisement technique pour le grand commerce alimentaire (sur 3 durées d'activation)

3.3. Gisement technico-économique

Le gisement technico-économique est également calculé pour chacun des secteurs, l'objectif étant d'estimer le gisement de capacités d'effacement accessible pour un niveau de rémunération donné (en €/kW/an).

Une analyse fondée sur l'estimation du coût de la disponibilité (et non du coût de l'activation)

L'étude se concentre sur une rémunération capacitaire de l'effacement, en €/kW/an, soit la disponibilité des effacements (et non la rémunération de l'activation en €/kWh) et les coûts qui y sont associés. En effet :

- D'une part, les décisions d'investissement et de mise en place d'effacements chez les acteurs sont aujourd'hui prises en tenant compte des revenus « assurés » liés à la mise à disposition de capacités plus qu'aux revenus liés à des activations sur demande de RTE au cours de l'année.
- D'autre part, l'hypothèse est prise que, pour les secteurs concernés, les coûts variables liés à une activation (ex : coût de la gestion informatique du système de pilotage de l'effacement) sont couverts par la rémunération variable (en €/kWh activé) des effacements. Ces coûts ne sont donc pas pris en compte dans le calcul de la rentabilité « capacitaire » de l'effacement.

Les valorisations d'effacement qui peuvent être réalisées par arbitrage sur les marchés énergie (NEBEF, ajustement) et potentiellement susceptibles d'améliorer la rentabilité des effacements (si marge sur coûts variables positive) ne sont pas prises en compte dans le cadre de cette étude. Les coûts variables peuvent correspondre à des pertes de production, coûts de redémarrage de process.

Principe général

L'estimation du gisement technico-économique à la maille nationale est fondée, pour chacun des secteurs, sur l'estimation du gisement technique calculé comme expliqué précédemment. Ce gisement technique est segmenté par tranche de sites ayant des tailles homogènes (segmentation fondée sur une segmentation de la consommation électrique du secteur par tranches de tailles de sites) et, pour chacune de ces tranches au sein d'un même secteur, on estime l'attente de rémunération d'un acteur (rémunération annuelle pour son site) afin de mettre en place des effacements. Cette attente de rémunération est estimée sur la base d'un pourcentage de la facture électrique (Cf Figure 26).

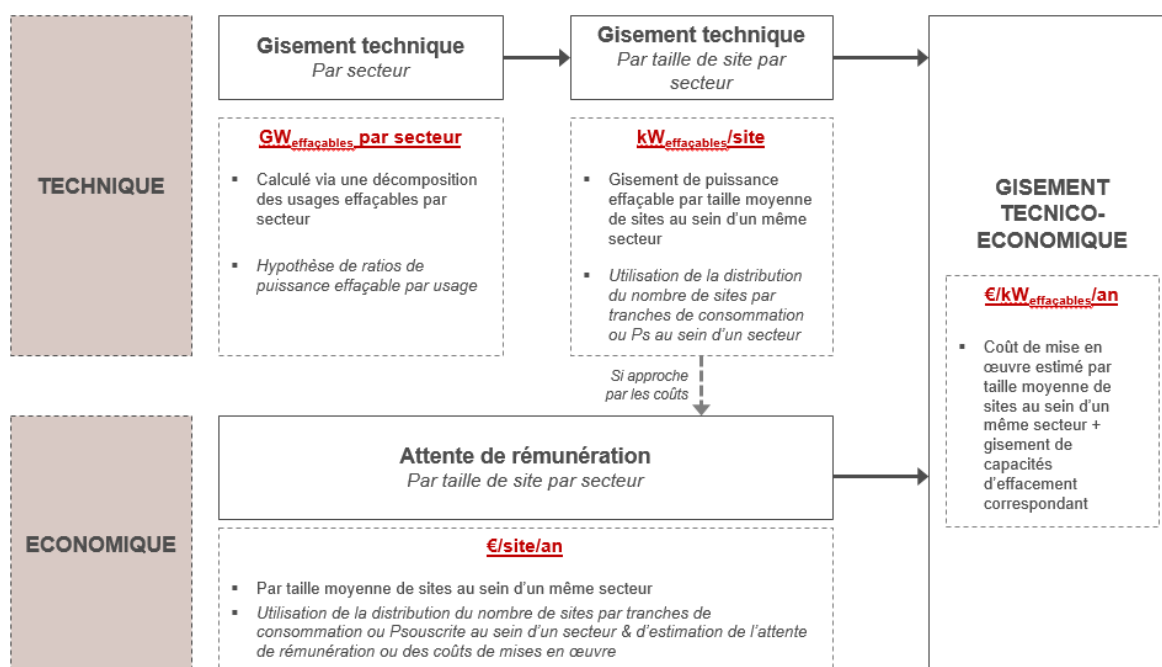


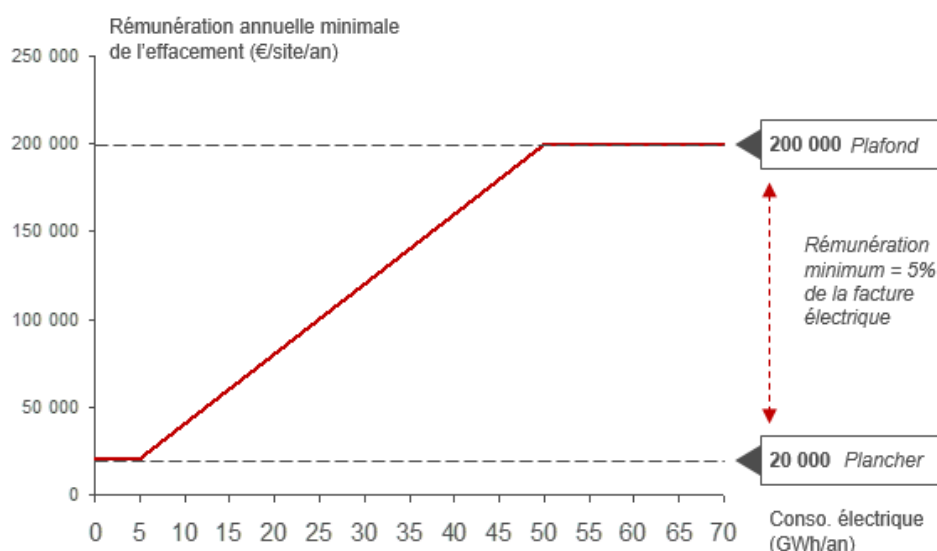
Figure 26 : Schéma de synthèse de la méthodologie d'évaluation des gisements technique et technico-économique

Une approche économique fondée sur l'attente de rémunération des consommateurs industriels et tertiaires

Pour tous les secteurs (intégralité des secteurs industriels et quelques secteurs du tertiaire, excepté le grand commerce alimentaire, les entrepôts frigorifiques et bureaux), la rémunération nécessaire est estimée dans un scénario de référence (des sensibilités sont réalisées sur des scénarios haut et bas) comme suit par une méthode fondée sur **l'attente de rémunération d'un acteur mettant en place un effacement sur son site. En effet, une grande partie des effacements peuvent être mis en place avec des investissements matériels limités mais nécessitent une adaptation des procédures, de l'organisation et de la formation du personnel. Une approche de type temps de retour sur investissements est ici moins adaptée.** Le raisonnement via l'attente de rémunération reflète mieux le raisonnement suivi par les industriels. Les hypothèses sont établies comme suit dans le scénario de référence²⁸ :

- La rémunération doit représenter un **minimum de ~20k€/site/an** afin de susciter un intérêt (seuil minimum absolu). Ce plancher matérialise le fait que, même si un effacement peut être rentable sur un site donné, s'il ne rapporte pas *a minima* ~20k€/an, les industriels ne sont pas incités à la mise en place d'effacements au vu des risques et adaptations de process qu'ils peuvent engendrer.
- Pour les sites présentant une facture électrique significative :
 - o La rémunération doit représenter un **minimum de 5% de la facture électrique** pour susciter un intérêt, c'est-à-dire que l'impact économique des effacements serait visible dans l'économie du site (ou *a minima* sur le montant de la facture électrique)
 - o Ou, si la rémunération **excède 200 k€/site/an**, l'effacement représente un intérêt pour le site consommateur (seuil maximum absolu)

²⁸ Pour les scénarios haut et bas, les hypothèses de seuils et % de la facture électrique sont prises et précisées en Figure 28



Cette méthodologie reposant sur le montant moyen de la facture électrique de chaque tranche de taille de site au sein d'un secteur, une hypothèse de prix de l'électricité variables en fonction de la puissance souscrite a été prise en compte dans la modélisation afin d'affiner l'estimation (données Insee 2014 – à noter que le coût moyen de l'électricité dans l'industrie en 2015 est égal à celui de 2014, EACEI ; voir Figure 27).

Prix de l'électricité par tranche de puissance souscrite (Source : Insee 2014)
[€/MWh]

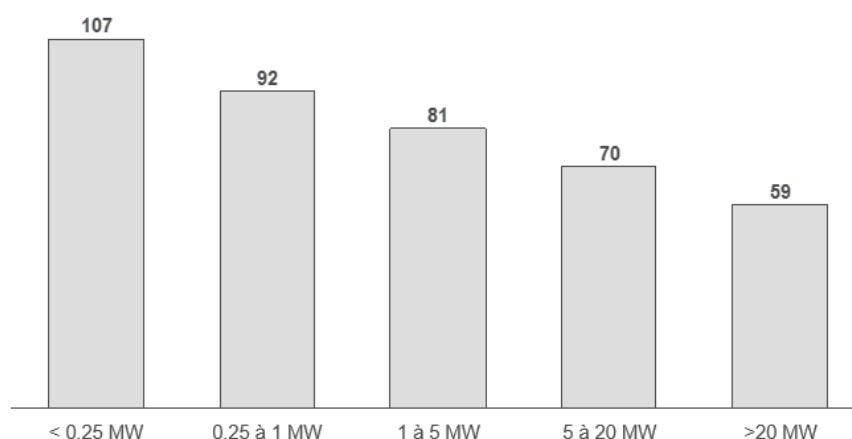


Figure 27 : Prix de l'électricité en fonction de la puissance souscrite dans l'industrie [Insee 2014]

Pour les secteurs du grand commerce alimentaire, entrepôts frigorifiques et bureaux, la méthodologie adoptée pour estimer la rémunération nécessaire pour rendre un gisement économique repose sur une estimation des coûts de mise en place des effacements pour un site dans ces secteurs. Cette méthodologie spécifique a été adoptée pour ces secteurs car la recherche de rentabilité liée à ces investissements est le raisonnement adopté pour motiver une décision de mise en place d'effacements. Ces coûts sont principalement :

- des coûts d'installation ou mise à jour de centres de pilotages des équipements consommateurs d'électricité (gestion technique du bâtiment GTB)
- des coûts opérationnels (gestion client, coûts informatiques).

Il est en effet estimé dans le cadre de l'évaluation du gisement technico-économique actuel qu'aujourd'hui, dans ces secteurs, les GTB existantes permettent de piloter le fonctionnement des équipements électriques mais pas de réaliser des effacements, les systèmes de communication centralisés étant rares. Ainsi, afin de mettre en place des effacements dans ces secteurs, il est nécessaire de modifier les GTB existantes ou d'investir dans de

Ces estimations de coûts ont en effet été établies lors des entretiens des études de cas et échanges avec les opérateurs d'effacement et sont présentés ci-dessous en Figure 28, pour le scénario de référence ainsi que les sensibilités haute et basse.

Méthodologie par les attentes de rémunération des consommateurs en vue de s'effacer

Scénario de référence :

- La rémunération doit représenter un minimum de **~20k€/site/an** afin de susciter un intérêt (seuil minimum absolu)
- Pour les sites présentant une facture électrique significative :
 - La rémunération doit représenter un minimum de **5% de la facture électrique** pour susciter un intérêt
 - Ou, si la rémunération excède **200 k€/site/an**, l'effacement représente un intérêt pour le site consommateur (seuil maximum absolu)

Critère de mise en place	Sc. référence	Sc. bas	Sc. haut
Plancher minimal	20 k€/an	20 k€/an	20 k€/an
% attendu sur la facture électrique	5% ¹⁾	7%	3%
Plafond maximal	200 k€/an	300 k€/an	100 k€/an

1) Pour un site d'une consommation électrique ~10GWh/an, 5% de la facture électrique représente ~40 k€/an

Pour certains secteurs du tertiaire (GCA, entrepôts frigorifiques et bureaux)

Scénario de référence :

CAPEX :

- GCA et bureaux :
 - Si nouvelle GTB : ~6 000 € fixes + 150€/kW_{installés}
 - Si GTB existante : ~2 000 € fixes + 50€/kW_{installés}
- Entrepôts frigorifiques :
 - Si nouvelle GTB : ~60 k€ (GTB) + 20k€ (études, logiciel)
 - Si GTB existante : ~30 k€ (câblages) + 20k € (études, logiciel)

OPEX (gestion informatique, gestion client) : ~1150€/site/an

Scénario bas : Hausse de 10% sur l'ensemble des coûts

Scénario haut : Baisse de 10% sur l'ensemble des coûts

Figure 28 : Méthodologies d'estimation de la rémunération des effacements nécessaire

Les deux méthodologies présentées ci-dessus permettent d'estimer pour un secteur donné, par site et en fonction de la taille de ce site, la rémunération nécessaire pour mettre en place des effacements en €/site/an. La répartition des sites par taille ayant permis d'estimer par site (en fonction de sa taille) le gisement technique d'effacement de process en kW_{effaçable}/site, **il est ainsi possible de connaître une estimation de la rémunération nécessaire pour mettre en place des effacements en €/kW_{effaçable}/an.**

3.4. Estimation du potentiel à plus long terme (horizon 2035)

Afin de donner une vision de l'évolution potentielle des gisements d'effacement à plus long terme, une extrapolation des gisements actuels techniques et technico-économiques dans les secteurs de l'industrie et du tertiaire étudiés est réalisée à horizon 2035. Cette extrapolation est fondée sur des scénarios d'évolution de la consommation électrique issues des travaux de l'ADEME (« Etude Actualisation du scénario énergétique ADEME 2035-2050 ») :

- Pour l'industrie, des **hypothèses d'évolution de la consommation électrique secteur par secteur** prenant en compte à la fois les évolutions de l'activité sectorielle et les efforts d'efficacité énergétique.
- Pour le tertiaire, une **hypothèse d'évolution de la consommation électrique du secteur tertiaire** (non différencié par secteur, présenté dans l'encadré ci-dessous) à horizon 2035. Cette évolution prend en compte à la fois les évolutions d'activité des différents secteurs du tertiaire et les efforts d'efficacité énergétique.

Par ailleurs, les estimations de parts effaçables, **répartition de la consommation par taille de site, attentes de rémunérations par site et coûts de l'électricité, restent invariantes** par rapport aux estimations de gisements à horizon actuel (cf Figure 29).

Pour l'extrapolation à horizon 2035 des gisements technico-économiques des secteurs tertiaires du grand commerce alimentaire, des entrepôts frigorifiques et des bureaux, les **coûts de mise en place des effacements évoluent** entre 2016 et l'horizon 2035. A l'heure actuelle, la totalité des coûts des GTB (ou de leur mise à jour) est prise en compte comme un coût de développement d'effacement car, les GTB existantes installées n'étant pas en mesure de réaliser des effacements, la mise en place d'effacements nécessite de nouveaux investissements dans ces équipements de pilotage. En revanche, à horizon 2035, il est estimé que, quelle que soit la taille du site, les GTB seront changées dans un but non directement lié à l'effacement. Leur premier objectif sera en effet l'efficacité énergétique et l'optimisation de la facture mais on peut faire l'hypothèse que ces équipements installés seront alors « *smart grid ready* », c'est-à-dire qu'ils permettront de réaliser des effacements de consommation. Ainsi, **seule une partie des coûts de ces nouveaux équipements pourra être affectée à l'effacement** et dans le cadre de l'estimation de gisement potentiel, **cette part des coûts attribuée à l'effacement fait l'objet d'une analyse de sensibilité** (la variable « part des CAPEX attribuée à l'effacement » variant entre 5 et 30%). Cette hypothèse permet d'estimer les coûts de développement des effacements sur ces secteurs par site et par an à horizon 2035.

Ainsi, sur la base de ces hypothèses, les gisements techniques et technico-économiques sont estimés pour chacun des secteurs selon la même méthodologie que pour les estimations de gisements actuels.

EVOLUTION DES HYPOTHÈSES D'ESTIMATION DES GISEMENTS À HORIZON 2035

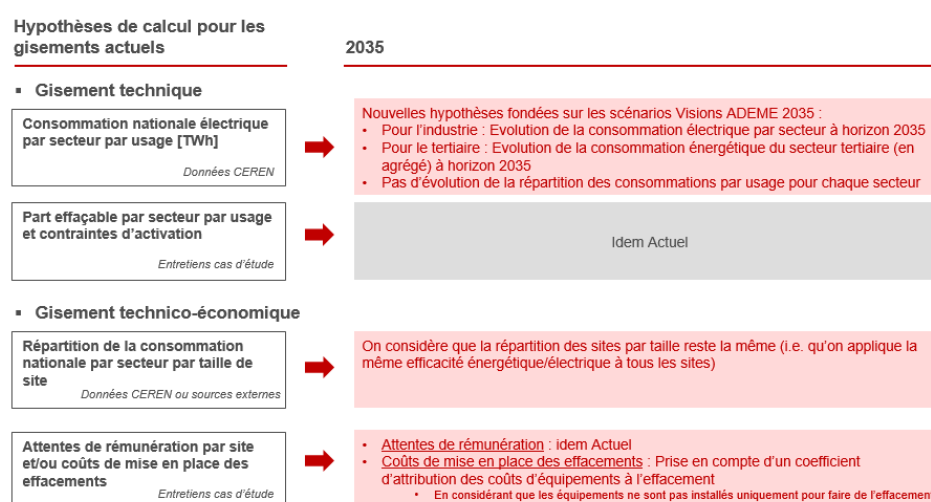


Figure 29 : Méthodologie d'extrapolation des estimations de gisements à horizon 2035

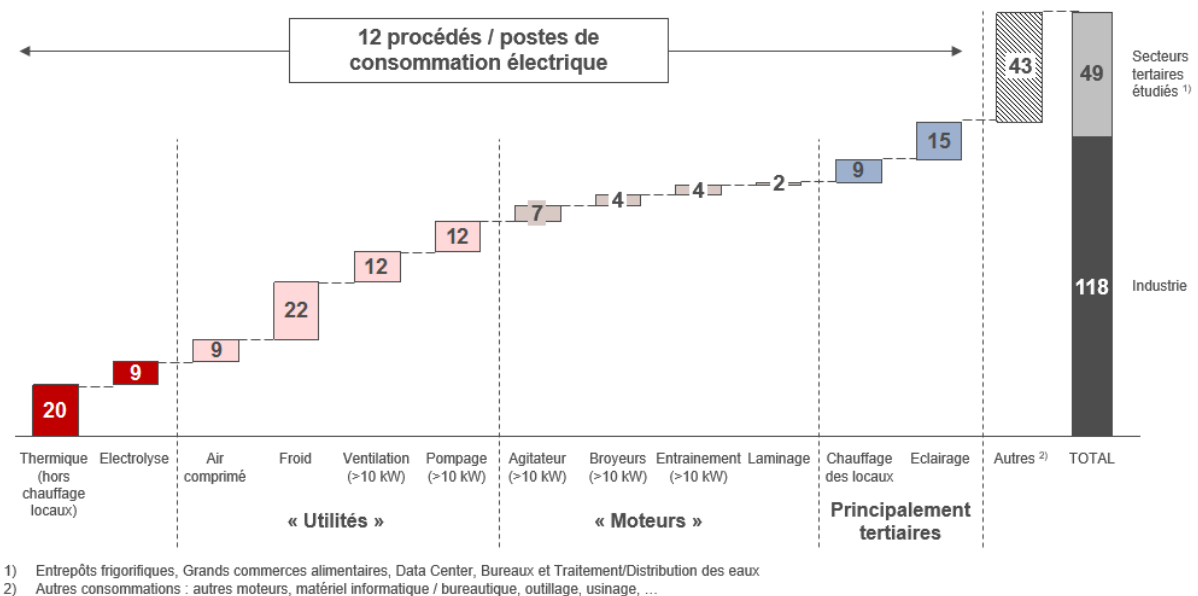
3.5. Limites de la méthodologie et domaine d'incertitudes

3.5.1. Forces de la méthodologie

Par la méthodologie qui a été adoptée, la multiplicité des acteurs ayant été interrogée, les études de cas sectorielles et les estimations de gisements à la maille nationale, les principales forces de cette étude sont les suivantes :

- Elle s'appuie sur des échanges riches avec les acteurs des secteurs dans le cadre des entretiens réalisés et des comités de pilotage de l'étude ayant pour but le partage des hypothèses méthodologiques et des résultats ; et notamment :
 - D'une part avec le gestionnaire de réseau de transport d'électricité, les régulateurs et les opérateurs d'effacement (à la fois français et internationaux)
 - D'autre part avec les entreprises sur lesquelles se fondent les études de cas sectorielles et les fédérations d'entreprises (industriels et tertiaires ayant fait partie du comité de pilotage).
- Par ailleurs, tous les secteurs de l'industrie et les principaux secteurs du tertiaire sont couverts, notamment grâce à des analyses sectorielles spécifiques couvrant à la fois l'analyse des process consommateurs d'électricité et les effacements valorisables dans chacun des secteurs.
- L'ensemble des différents « macro-usages » de l'électricité sont considérés (pas d'exclusion de certains usages), avec une déclinaison de ces usages secteur par secteur afin de pouvoir *in fine* donner une vision des gisements techniques et technico-économiques par secteur (industriel ou tertiaire) ou par macro-usage de l'électricité

CONSUMMATION PAR « PROCESS » DANS L'INDUSTRIE ET LES SECTEURS TERTIAIRES ETUDIÉS [TWh/AN] – Données 2013



- L'estimation du potentiel est fondée sur des études de cas concrètes et précises alimentées par des entretiens approfondis auprès d'acteurs industriels et tertiaires.
- L'estimation à la maille nationale repose aussi sur des données de consommations sectorielles nationales précises issues de données du CEREN, provenant d'enquêtes annuelles pertinentes (avec une année de référence commune pour la plupart des secteurs : 2013)

3.5.2.Limites de la méthodologie

L'estimation des gisements potentiels d'effacement repose sur l'extrapolation d'une trentaine de cas d'étude et présente donc un certain nombre d'incertitudes et limites inhérentes à tout travail d'extrapolation et de perspectives de secteurs complexes. Les calculs réalisés en vue d'une estimation des gisements sont fondés sur des données « moyennes » issues d'un nombre limité de cas d'étude sectoriels alors que les situations sont, en réalité, plus hétérogènes d'un site à l'autre au sein d'un même secteur. Par ailleurs, l'approche économique est simplifiée notamment pour cause d'un manque de données précises sur les coûts de mise en œuvre des effacements.

- La première limite se situe dans la **finesse de la segmentation par secteur et les incertitudes quant à la représentativité des études de cas**. En effet, l'étude se fonde sur un nombre limité d'études de cas par « grands secteurs industriels » regroupant parfois des « sous-secteurs » avec des problématiques spécifiques. Au sein d'un même sous-secteur globalement homogène, certaines contraintes peuvent néanmoins être spécifiques à un site donné. ***Pour illustration, certains secteurs sont relativement homogènes, comme le verre, le papier ou la plasturgie-caoutchouc, d'autres le sont beaucoup moins comme l'agro-alimentaire ou la chimie : à titre d'exemple, on applique dans l'ensemble de l'agro-alimentaire une part moyenne effaçable de la puissance appelée de 16%, alors qu'un calcul plus fin donne une part effaçable dans l'industrie de la viande de 41%, et une part effaçable dans le secteur des aliments pour animaux de 9% pour des process effacés semblables.*** L'estimation des ratios de puissance effaçable par usage et des contraintes liées pourraient être affinés en segmentant certains secteurs, notamment dans l'industrie, en sous-secteurs plus homogènes ou en travaillant sur un modèle micro-économique. Les études de cas permettent de faire émerger les grandes tendances et les principaux chiffres de potentiels.
- La deuxième limite est liée à la **finesse de la segmentation des consommations d'électricité nationales par secteur par tranche de consommation**. Une approche économique fondée sur une segmentation du calcul par niveau de puissance souscrite ou par tranche de consommation pouvant néanmoins regrouper des consommateurs de tailles différentes (jusqu'à un facteur 4 ou 5) a pour limite de donner une vision moyennée par tranche de taille de sites alors que les sites de cette tranche ont des tailles variées. Certains points extrêmes (notamment chez de gros consommateurs pouvant constituer un gisement faible mais rentable) peuvent de fait ne pas apparaître au cours de l'estimation des gisements technico-économiques.
- La **méthodologie de calcul économique est simplifiée** dans la plupart des secteurs car elle s'appuie sur une « **attente de rémunération** » et non sur les coûts réels de mise en œuvre des effacements de process. Faute de données précises et homogènes recueillies auprès des acteurs interrogés sur les coûts de mises en œuvre (CAPEX & OPEX), une approche économique simplifiée pour les secteurs industriels et pour certains secteurs du tertiaire a été mise en œuvre sur la base d'une « attente de rémunération ». Néanmoins, cette méthode reflète bien le raisonnement économique qui conduit aujourd'hui les grands consommateurs à valoriser ou non leurs capacités.
- **L'étude ne prend pas en compte les gains potentiels liés aux marchés énergie**. L'activation d'effacement de consommation sur les marchés énergies (et via NEBEF notamment) pourrait, pour des effacements à faible coût variable, améliorer la rentabilité des capacités (en représentant une source de rémunération additionnelle à la rémunération capacitaire) et ainsi diminuer l'attente de rémunération fixe pour la mise en œuvre de ces capacités à terme. Cet impact serait principalement visible sur les effacements à faibles coûts variables (comme l'effacement de froid dans le secteur du grand commerce alimentaire) et dans une hypothèse d'évolution des spreads (écart prix électricité entre base et pointe) aujourd'hui non favorables à l'activation régulière d'effacements sur les marchés énergie

Toutes ces limites ont été présentées aux membres du Comité du pilotage, et les différentes hypothèses ont été partagées.

FORCES	LIMITES
- Construction de la méthodologie et partage des résultats avec les acteurs du secteur - Opérateurs d'effacement et gestionnaires de réseau ++ - Entreprises des secteurs industriel et tertiaire et fédérations d'entreprises - Traitement spécifique de chacun des secteurs de l'industrie et du tertiaire sélectionnés : analyse par <u>process</u> ++ - Prise en compte de l'ensemble des « macro-usages » consommateurs d'électricité + - Estimation des gisements d'effacement fondée sur des études de cas concrètes et précises (~30 cas concrets analysés) ++ - Estimation des gisements d'effacement fondée sur des données statistiques robustes par secteur +	- Finesse de la segmentation par secteur et incertitudes quant à la représentativité des études de cas par secteur -- - Finesse de la segmentation des consommations d'électricité nationales par secteur et tranche de consommation - - Méthodologie de calcul économique simplifiée, par attentes de rémunération et non sur des coûts réels de mise en œuvre des effacements -- - Absence de prise en compte des gains potentiels liés aux marchés énergie -

4. Résultats de l'estimation des gisements techniques et technico-économiques - Analyse des gisements à court et moyen terme

4.1. Détail des gisements et caractéristiques techniques des capacités d'effacement par secteur

4.1.1. Métallurgie

4.1.1.1. Présentation du secteur

La métallurgie comprend la sidérurgie (NCE 16) et la métallurgie des non ferreux (NCE 18).

C'est un secteur fortement concentré, avec moins de 200 établissements. Sa consommation électrique est d'environ 18 TWh en 2013.

La puissance souscrite cumulée est d'environ 3,5 GW.

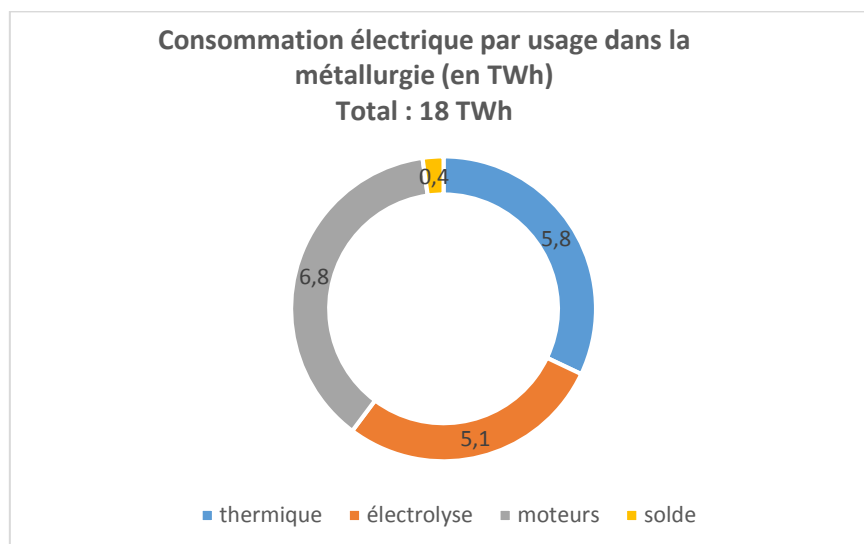


Figure 30 : Consommation électrique nationale du secteur de la métallurgie (CEREN, 2013)

La consommation électrique se partage de manière assez équilibrée entre les usages thermiques (fusion de l'acier essentiellement), l'électrolyse et les moteurs (Figure 30).

Les sites de production d'aluminium de première fusion consomment plus de 90% de leurs besoins électriques pour l'électrolyse, tandis que 70% et plus des besoins électriques des aciéries électriques vont à la fusion. Les besoins des sites sidérurgiques intégrés correspondent pour l'essentiel à des usages moteurs.

Dans la sidérurgie, on peut distinguer quatre filières principales :

- Les sites intégrés qui sont de très gros producteurs d'acier à l'oxygène
- Les aciéries électriques produisant de l'acier dans des fours de fusion à arc alimentés par des ferrailles
- Les sites de production de ferro-alliages utilisant également des fours à arc
- Les sites de 2nd transformation (exemple : laminage).

Dans la métallurgie des non ferreux, on peut distinguer les sites selon le métal fabriqué (aluminium, plomb, zinc, nickel et cuivre essentiellement) et le process (en première fusion ou deuxième fusion). L'électrolyse ne concerne d'ailleurs en France que deux produits, l'aluminium et le zinc.

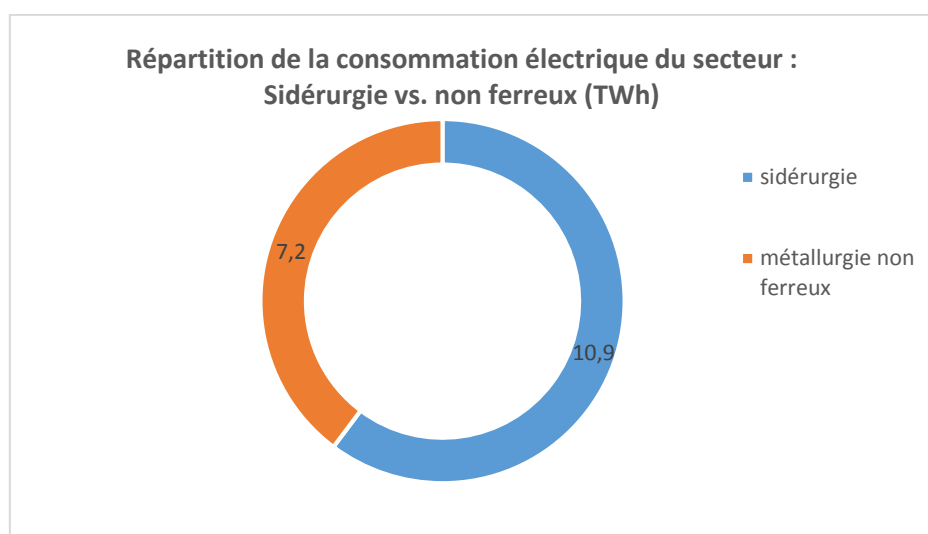


Figure 31 : Répartition de la consommation électrique du secteur : Sidérurgie vs. non ferreux

Le plus gros usage des moteurs dans la métallurgie est constitué par le laminage (pour obtenir des produits plats) qui se situe principalement dans la sidérurgie.

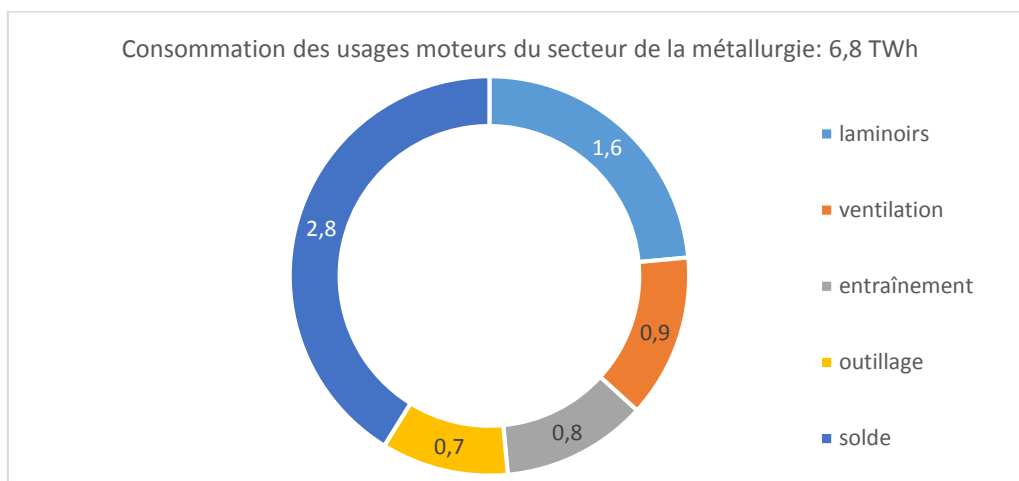


Figure 32 : Consommation des usages moteurs du secteur de la métallurgie

La ventilation représente également un poste important qui s'explique par la nécessité de traiter les effluents gazeux générés par les process métallurgiques.

Le solde comprend des utilités comme la production d'air comprimé, la production de froid et le pompage, ainsi que des usages process comme l'outillage.

4.1.1.2. Variabilité de la consommation dans le temps

La plupart des établissements fonctionnent en 3x8 h sans arrêt le week-end et n'ont pas de caractère saisonnier, ce qui a pour conséquence un profil de consommation plat.

On note cependant un fléchissement de la consommation au mois d'août et au mois de décembre dans la sidérurgie et une très légère baisse en août dans la métallurgie des non ferreux, ce qui peut s'expliquer essentiellement par des arrêts programmés de maintenance.

4.1.1.3. Les usages effaçables et les contraintes associées

Tous les entretiens réalisés avec les industriels ont mis en exergue des puissances effacées et « effaçables ».

Le secteur est historiquement propice à l'effacement, ayant d'une part des usages susceptibles de s'effacer, comme la fusion et l'électrolyse, et ayant d'autre part des sites ayant des consommations d'électricité élevées, voire très élevées (de plusieurs centaines de GWh, parfois de quelques TWh). Quatre procédés ont été qualifiés d'effaçables :

La fusion

Description du process

Elle est réalisée dans un four à arc qui utilise l'énergie thermique de l'arc électrique pour obtenir une température suffisante à la fusion du métal. Le four à arc peut être employé pour la production d'acier, ou pour la production de ferro-alliages (ferrochrome, ferromanganèse, ferrosilicium...).

Flexibilité du process

- Pour les ferro-alliages, les fours peuvent être arrêtés sauf pendant des périodes critiques, comme les périodes de montée en température ou les périodes de cuisson des électrodes (exemple cité où la puissance effaçable est de 74 % de la puissance installée)
- Pour la fusion électrique de l'acier, il faut pouvoir gérer la coulée en cours ou l'arrêter quand c'est possible (il y a une période critique au cours de laquelle les réfractaires du four peuvent être endommagés).

Pour des effacements d'une durée minimale de 2 h, il peut être envisagé d'effacer également les auxiliaires, qui consomment environ 10% de la consommation des fours, comme les filtres de dépoussiérage ou les pompes de refroidissement du four, mais de manière décalée par rapport à l'arrêt du four, d'au moins une demi-heure.

L'électrolyse

Description du process

C'est le seul procédé de fabrication de l'aluminium de première fusion à l'échelle industrielle. Il se passe à température élevée (plus de 900°C) avec de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue. L'électrolyse est utilisée aussi pour produire du zinc.

Flexibilité du process

Selon un industriel de la production d'aluminium interrogé, il est possible de baisser la puissance appelée, d'environ 25% selon la durée de l'effacement, qui est obtenue par une diminution de l'intensité. Aller au-delà pourrait nettement dégrader le rendement énergétique du process et les émissions de gaz à effet de serre. Il est estimé, qu'à terme, grâce à des solutions innovantes à développer la puissance effaçable pourrait être accrue, jusqu'à 40 ou 50 %.

Un industriel de la production de zinc propose une baisse de la puissance appelée de ses cuves d'électrolyse de 70%, elles ont besoin d'une intensité minimale pour éviter la redissolution du zinc déposé.

Le laminage

C'est un procédé en partie « effaçable » techniquement mais qui suscite des réserves d'ordre économique quant à sa mise en place, notamment pour les aciers plats au carbone pour lesquels l'électricité représente moins que les coûts de personnel et environ 10% du coût de fabrication.

Un groupe de production d'acier électrique propose de l'effacement avec RTE pour de l'interruptibilité pour le train de laminage d'une de ses aciéries. L'effacement est ainsi plus économique pour les aciéries électriques, mais le laminoir peut être appelé de manière irrégulière, il fonctionne en tout ou rien pendant la durée de l'opération (la puissance peut être appelée moins du tiers du temps de l'opération), ce qui rend difficile la mise en œuvre de l'effacement.

Autres opérations unitaires

D'autres opérations unitaires ont été indiquées comme « effaçables », en particulier :

- l'agglomération dans les sites intégrés de production d'acier à l'oxygène, mais avec une consommation électrique relativement faible rapportée à la consommation électrique très élevée du site, et donc avec un potentiel d'effacement pas ou très peu visible.
- pour les lignes de galvanisation, environ 10% de la puissance pourraient être effacés, baisse obtenue en ralentissant la cadence de production.

4.1.1.4. Les caractéristiques de l'effacement

Puissance disponible	La puissance disponible et faisant l'objet aujourd'hui d'un effacement est très variable suivant les produits et les process, elle va de 10 à 75% de la puissance appelée.
Durée d'activation	Les durées d'effacement se situent dans une plage très large, allant de 30 secondes à 13 heures.
Délai d'activation	Le délai d'activation pour des appels d'offre est très souvent d'une heure et demie.
Fréquence d'activation	La fréquence d'activation est limitée à une ou deux fois par jour, et même 4 fois pour un site ; ce dernier cas est possible si la durée d'activation ne dépasse pas 1 heure (et 2 heures pour 2 fois).
Contraintes techniques (stock, perte de production...)	L'effacement a pour conséquence une perte de production qui peut parfois être rattrapée dans le temps si le site est en surcapacité par rapport au marché actuel. Dans certains cas, la production est perdue définitivement, le site fonctionnant à sa capacité nominale. Il peut y avoir une nécessité de stockage de produit lorsqu'on arrête une ligne, et pas celle en aval, comme par exemple l'arrêt de l'atelier fusion et non celui du laminage dans une aciérie électrique. Les pertes de production sont souvent estimées en quantité par heure et par MW effacé, ou bien en € par unité de temps lorsque l'atelier est totalement arrêté (par exemple, quelques milliers d'euros par heure).
Effet rebond/ report	Dans un cas, l'effacement a pour conséquence une surconsommation énergétique, du fait qu'on ne bénéficie plus de l'enfournement à chaud. Dans un autre cas, il n'y a pas de surconsommation énergétique, l'industriel s'effaçant tant que son efficacité énergétique ne se dégrade pas.
Contraintes organisationnelles (réorganisation des équipes...)	Activation automatique ou manuelle selon les cas Dans la mesure des possibilités, et notamment des délais de mobilisation et d'activation, ainsi que de la durée d'activation, il peut y avoir une réorganisation des équipes : le personnel peut travailler à des opérations de maintenance, ou être appelé à prendre une RTT.

4.1.1.5. Freins et barrières au développement de l'effacement

Le secteur participe déjà de manière importante à la flexibilisation du secteur électrique les industriels ont été amplement sollicités par les différents acteurs de l'effacement.

Il existe donc un potentiel de développement supplémentaire relativement limité, avec certains freins et barrières transmis lors des entretiens et qui sont décrits ci-après.

- **Un gisement limité par des contraintes métiers :**

Les contraintes métiers identifiées sont :

- La difficulté d'arrêter les auxiliaires de fours pour des raisons environnementales (le four continue à émettre des fumées pendant quelque temps après son arrêt).

- Les temps de redémarrage des installations qui croissent fortement avec la durée de l'arrêt (par exemple 6 h de redémarrage après un arrêt de four de 18 h)
 - Des process parfois très difficiles à arrêter puis redémarrer (cokeries)
 - Les process noyés dans des sites de forte consommation et ayant des fluctuations importantes dans la journée (pour l'agglomération du minerai de fer dans les sites intégrés)
 - Des process fluctuants (par exemple le laminage avec une puissance appelée 50 minutes pendant un cycle de 3 h)
 - Des risques de dégradation ou de casse (percée des poches de fusion par exemple)
 - La limitation des rejets de polluants
- **Un gisement limité par les pertes de production et donc un niveau de rémunération jugé parfois insuffisant**

Si le site est en période de sous-activité, la production peut être rattrapée dans le temps, il n'y a pas de pertes de production. Si ce n'est pas le cas, il y a une perte qui est d'autant plus coûteuse que le cours du métal est élevé. La rémunération est alors jugée insuffisante pour des produits ayant une valeur ajoutée élevée.

Par exemple, un industriel a indiqué ne pas pratiquer d'effacement (et ne l'envisage pas) pour un de ses sites qui fait de l'acier inox à haute valeur ajoutée, considérant que les pertes de production seraient beaucoup trop élevées.

- **Une visibilité insuffisante**

Des travaux de développement seraient nécessaires pour augmenter le potentiel d'effacement d'un industriel, ce qui ne peut s'envisager que si les règles de la mise en œuvre de l'effacement soient connues pour un horizon de 5 à 6 ans (au lieu d'un an actuellement).

4.1.1.6. Le gisement technique d'effacement de process

Il est calculé à partir de la consommation par usage du secteur ou par filière de production, du fait des spécificités très fortes de certains process, comme ceux de la production d'acier électrique, l'aluminium de première fusion, le zinc...

La puissance moyenne appelée a été estimée à partir de la consommation en prenant en compte une durée moyenne d'utilisation de 8000 h par an à l'exception de la production d'acier électrique ou de ferro-alliages (4500 h selon les sources des industriels) et des autres usages thermiques.

La durée d'effacement peut aller jusqu'à 8 h à l'exception de la production d'aluminium pour laquelle la durée possible communiquée est d'1 h 30.

En conséquence, étant donné la forte concentration de la production d'aluminium et le foisonnement nécessaire pour allonger la durée d'effacement, le potentiel d'effacement de ce process diminue avec la durée d'effacement et devient nul sur des périodes d'effacement longues.

filière ou procédé	puissance appelée moyenne accessible (GW)	part accessible	puissance effaçable 1/2 h (GW)	puissance effaçable 2 h (GW)	puissance effaçable 8 h (GW)
acier électrique	0,67	75%	0,50	0,50	0,50
ferro-alliages	0,20	85%	0,17	0,17	0,17
non ferreux	0,58	38%	0,22	0,19	0,04
laminage	0,58	50%	0,29	0,29	0,29
fours hors fusion	0,33	50%	0,17	0,17	0,17
autres : agglo, chauffage...	0,12	43%	0,05	0,04	0,01
TOTAL			1,40	1,36	1,18

Ce tableau est le résultat d'un scénario médian en ce qui concerne la part accessible ou effaçable de la puissance moyenne appelée par filière de production.

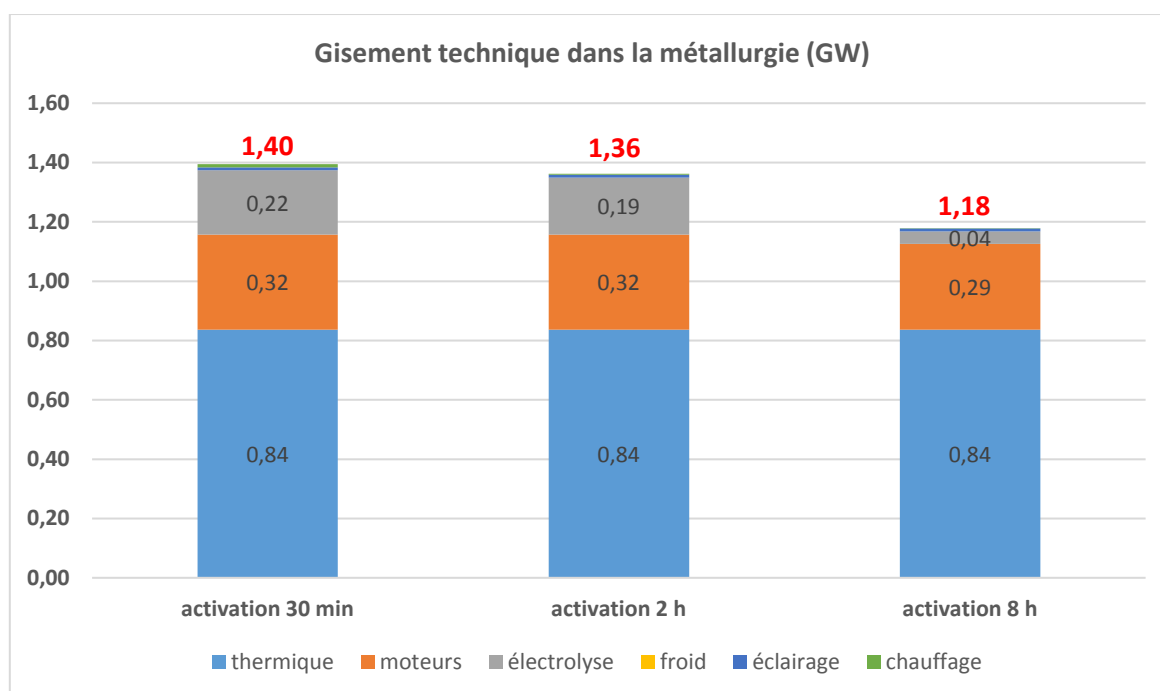


Figure 33 : Estimation du gisement technique dans la métallurgie (scénario médian)

Cette part accessible a fait l'objet d'une valeur basse et d'une valeur haute, ce qui conduit à :

- un gisement technique d'effacement à 30 minutes (et à 2 heures) entre 1,2 et 1,6 GW (valeur médiane 1,40 GW)
- un gisement technique d'effacement à 8h entre 1 et 1,4 GW (valeur médiane 1,18 GW).

4.1.1.7. Le gisement technico-économique d'effacement de process

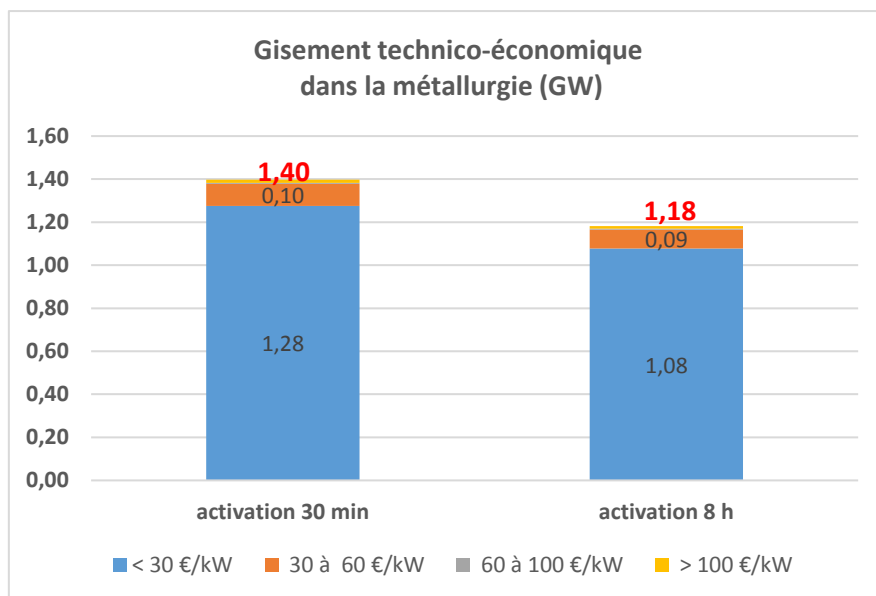


Figure 34 : Estimation du gisement technico-économique dans la métallurgie

Le gisement d'effacement est largement accessible, il est atteignable à plus de 90 % pour une rémunération de 30 €/kW, et à 98 % pour une rémunération de 60 €/kW, ce qui est corroboré par la maturité des acteurs de ce secteur qui utilisent largement aujourd'hui la valorisation de l'effacement.

En prenant en compte un scénario bas qui allie des hypothèses basses pour le gisement technique et pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique est porté à 300 k€) et un scénario haut alliant des hypothèses hautes, notamment pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique passe de 200 à 100 k€), le gisement accessible à 30€/kW est dans une fourchette de 0,9 à 1,5 GW.

À 60 €/kW, il se situe dans une fourchette de 1,1 à 1,6 GW.

4.1.2. Chimie

4.1.2.1. Présentation du secteur

La chimie comprend 5 secteurs NCE :

- Les engrais (NCE 23)
- La chimie minérale hors engrais (NCE 24)
- La production de plastiques, de caoutchouc synthétique et de textiles artificiels (NCE 25)
- La chimie organique hors plastiques (NCE 26)
- La parachimie et la pharmacie (NCE 28).

Sa consommation électrique est d'environ 23 TWh en 2013. Les trois quarts de la consommation électrique sont concentrés dans deux secteurs NCE : la chimie minérale hors engrais et la chimie organique hors plastiques (Figure 37).

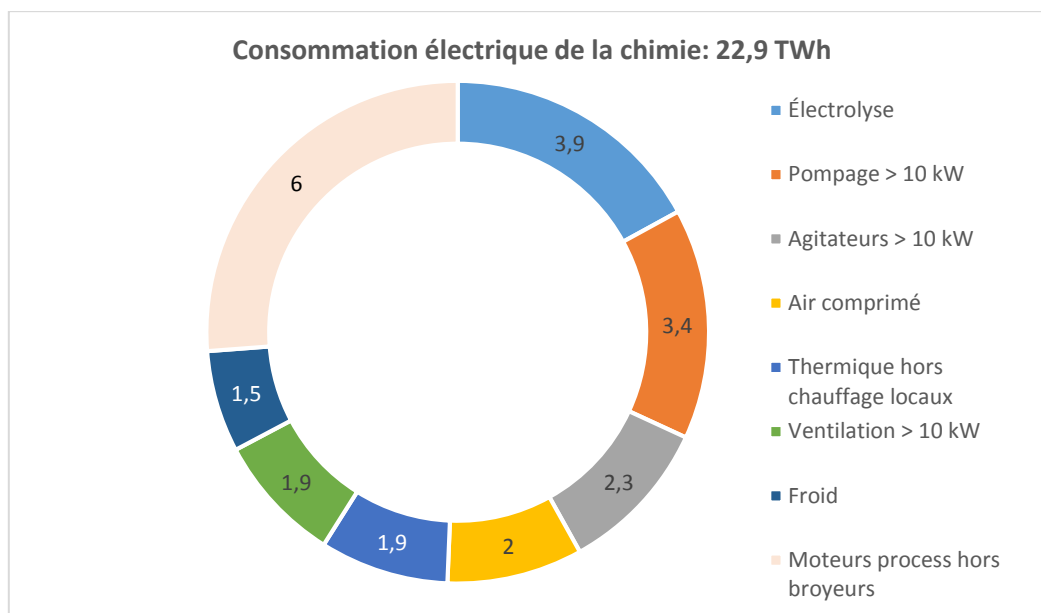


Figure 35 : Consommation électrique de la chimie en 2013 (CEREN)

La chimie présente la particularité d'avoir une consommation électrique importante en électrolyse (17%), devant celle à usage thermique qui est plutôt faible (8%). En dehors de l'éclairage (à peine 3%) le reste correspond à de la force motrice (72%), avec un poids important pour le pompage (Figure 35).

Les besoins de la force motrice concernent toutes les utilités (pompage, production d'air comprimé et de froid...) et les usages process, en premier lieu les agitateurs/malaxeurs/mélangeurs/extrudeuses.

Le solde correspond à des usages moteurs dans les process, comme le broyage.

Cette répartition est le résultat statistique de profils très différents, notamment dans la chimie lourde où l'on peut avoir des profils très largement à usage thermique (électrochimie), ou bien surtout pour l'électrolyse (production de chlore), ou bien encore à usage moteurs.

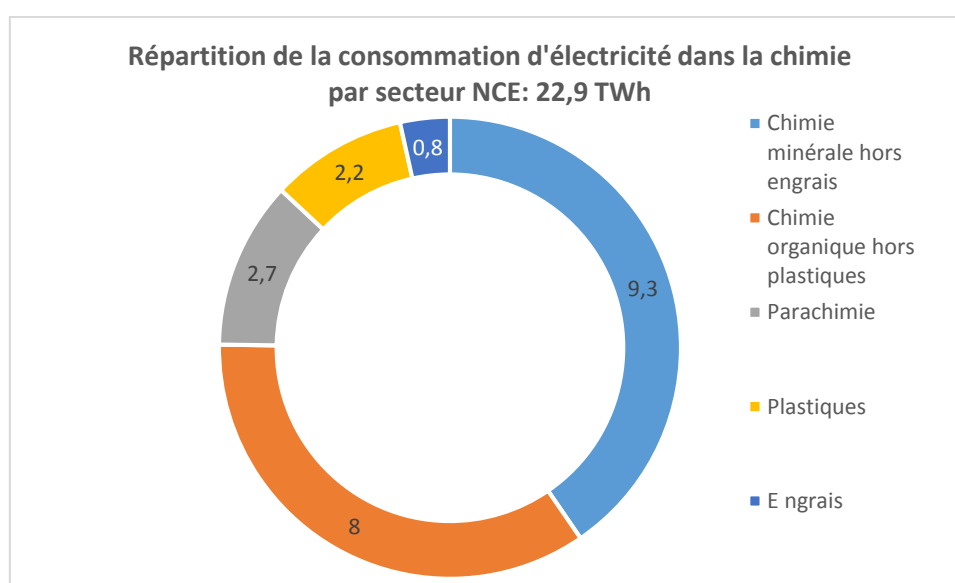


Figure 36 : Répartition de la consommation électrique de la chimie par secteur NCE

4.1.2.2. Variabilité de la consommation dans le temps

La majorité des établissements fonctionne avec des régimes de fonctionnement continus ou quasi continus (arrêt le week-end), une forte minorité (plus du tiers) fonctionne en 2x8h ou 1x8h.

Cependant, 85% de la consommation résultent de sites fonctionnant en 3x8 h sans arrêt le week-end.

Le profil de la consommation est généralement plat, mais avec des fluctuations pour les process de la chimie organique qui ne sont pas stables (réactions de chimie organique).

La durée de la puissance moyenne appelée est de 8000 h par an dans la chimie minérale à l'exception de certaines productions (exemple : la production de silicium à 4500 h par an). Elle est de 5000 h par an dans les autres secteurs de la chimie.

Il n'y a pas de caractère saisonnier dans la production.

4.1.2.3. Les usages effaçables et les contraintes associées

En dehors des usages transverses effaçables comme le chauffage des locaux ou l'éclairage, les entretiens réalisés ont mis en exergue des puissances « effaçables » dans 3 domaines : la fusion, l'électrolyse et la liquéfaction de gaz. Tous les entretiens réalisés dans la chimie minérale ont mis en exergue des puissances effaçables faisant l'objet d'une valorisation actuelle, à l'inverse de ceux réalisés dans la chimie organique ou dans la chimie fine.

Le secteur de la chimie est très contraint par la cinétique des procédés : une réaction chimique ne peut pas être arrêtée avant la stabilisation de la molécule.

La fusion

Elle est réalisée dans un four à arc pour la production de silicium, comme pour la production de ferro-alliages (ferrochrome, ferromanganèse, ferrosilicium...) déjà décrite dans le paragraphe relatif à la métallurgie.

Pour le silicium, les fours peuvent être arrêtés sauf pendant des périodes critiques, comme les périodes de montée en température ou les périodes de cuisson des électrodes.

Pour des effacements d'une durée minimale de 2 h, il peut être envisagé d'effacer également les auxiliaires, qui consomment environ 10% de la consommation des fours, comme les filtres de dépoussiérage ou les pompes de refroidissement du four, mais de manière décalée par rapport à l'arrêt du four, d'au moins une demi-heure.

L'électrolyse

Il s'agit de l'électrolyse du chlore qui est réalisée dans une dizaine de sites, avec plusieurs procédés (mercure, diaphragme et membranes), le dernier étant le plus énergétiquement efficace et substituant les autres, surtout celui au mercure qui est voué à disparaître pour des raisons environnementales et réglementaires.

L'effacement est effectué en diminuant l'intensité du courant, et donc la puissance appelée. Des contraintes techniques, notamment celle de maintenir une température minimale dans les cellules d'électrolyse (en particulier pour la production de chlore-sodium) ne permettent pas stopper leurs alimentations électriques.

La liquéfaction de gaz industriels

Le marché des gaz industriels (oxygène et azote principalement) est composé d'un marché en vrac pour les installations industrielles importantes qui sont alimentés directement sous forme gazeuse, et en bouteilles pour

les autres installations. Il faut donc une opération de liquéfaction des gaz industriels pour ceux-ci. Les sites de production possèdent une voire deux lignes de liquéfaction qui comprend des compresseurs.

L'effacement se pratique en arrêtant certaines unités de liquéfaction (et en maintenant d'autres unités), elle se fait donc en *pooling* au sein d'une entreprise.

Il y a des contraintes de fonctionnement, les unités de liquéfaction fonctionnant continûment pendant plusieurs jours puis s'arrêtant.

Par ailleurs, la fabrication est faite en dehors de la journée avec des équipes en astreinte, ce qui complique la réalisation d'effacements demandés le matin ou le soir.

Autres opérations

Les usages thermiques autres que la fusion, ainsi que les opérations transverses telles que la production de froid, l'éclairage et le chauffage des locaux sont considérées comme dans les autres secteurs effaçables.

4.1.2.4. Les caractéristiques de l'effacement

La part de la puissance effaçable est variable suivant l'opération :

- plus de 80% dans les fours à arc ;
- environ 50% pour l'électrolyse du chlore
- de 10% dans les gros sites à 75% dans les petits sites pour la liquéfaction des gaz industriels (ce qui s'explique par un effet de structure de marché : les gros sites livrent essentiellement en continu leurs clients, les petits sites livrent surtout en bouteilles).

Les sollicitations d'effacement acceptables sont la veille pour le lendemain, avant si possible.

Le délai possible d'activation est entre 2 h et 3 h, il peut être dans le cadre de l'électrolyse largement inférieur, certains industriels ayant souscrit au mécanisme de réserves rapides (activation en 9 minutes).

La durée maximale d'effacement est indiquée d'une heure à une heure et demie pour l'électrolyse (au-delà le risque process est jugé élevé), de 2 h pour la liquéfaction des gaz industriels, et jusqu'à une journée pour la fusion.

La répétitivité au sein d'une même journée n'est pas jugée possible par les entreprises interrogées dans les secteurs des gaz industriels et du chlore, elle est jugée possible dans la production de silicium si la durée d'effacement est courte, 1 h environ, et 3 h au maximum.

Les sites interrogés ont des dispositifs de pilotage de leurs consommations, au niveau du site voire des entreprises (et l'une d'entre elles a lancé un grand projet d'automatisation complète des sites avec conduite à distance 24 h sur 24).

4.1.2.5. Freins et barrières au développement de l'effacement

Le secteur, en tout cas la chimie minérale, participe déjà de manière importante à l'effacement, les industriels ont été amplement sollicités par les différents acteurs de l'effacement.

Il existe ainsi un potentiel de développement relativement limité, avec certains freins et barrières décrits ci-après et transmis lors des entretiens

- **Un gisement limité par des contraintes métiers**

Les contraintes métiers identifiées sont :

- la difficulté d'arrêter les auxiliaires de fours pour des raisons environnementales
- les temps de redémarrage des installations qui croissent fortement avec la durée de l'arrêt (par exemple 6 h de redémarrage après un arrêt de four de 18 h)
- l'altération éventuelle de la qualité de la production, comme dans le cas du chlore
- des process instables et fluctuants dans les sites de chimie organique
- la limitation des rejets de polluants

- **Un gisement limité par les pertes de production**

Si le site est en période de sous-activité, la production peut être rattrapée dans le temps, il n'y a pas de pertes de production.

Si ce n'est pas le cas, il y a une perte qui est d'autant plus coûteuse que le cours du produit fabriqué est élevé.

- **Un gisement plus limité par l'organisationnel que par les investissements à mettre en place**

À l'exception d'un projet très coûteux d'automatisation et de pilotage à distance des sites, les investissements mis en place sont limités, de quelques centaines de milliers d'euros tout au plus (équipements, communication, formation). Ce sont plus des dépenses ou des coûts indirects que des investissements, il faut expliquer, former et rémunérer les opérateurs à une pratique qui va à l'encontre d'une culture industrielle qui est d'avoir une production optimale. Il faut également parfois pouvoir mobiliser des équipes en heures supplémentaires pour rattraper si possible la production perdue lors de l'effacement, avec des surcoûts et des limites réglementaires. Il peut aussi être nécessaire de mobiliser des équipes en astreinte afin de redémarrer la production après un effacement.

- **Un gisement limité par l'existence et le niveau des stocks**

Une entreprise pense qu'il faudrait augmenter le stockage de produits actuellement limité pour un coût de l'ordre d'1 M€ par site.

4.1.2.6. Le gisement technique d'effacement de process

Il est calculé à partir de la consommation par usage du secteur, sauf dans la chimie minérale où l'on part d'une consommation par filière de production, du fait des fortes spécificités des principaux process, l'électrolyse du chlore, l'électrochimie, la fabrication de gaz industriels.

La puissance moyenne appelée a été estimée à partir de la consommation annuelle en prenant en compte une durée annuelle de 5000 h par an (source étude CEREN sur le parc des équipements dans l'industrie), à l'exception de la production de silicium (4500 h, source industriels), du solde de la chimie minérale (8000 h), de la production de froid (8000 h pour les chambres froides, 6000 h pour la climatisation process).

La durée maximale d'effacement est variable suivant les applications :

- 1 h 30 pour le chlore (en particulier pour la production de chlore et de sodium)
- 2 h pour les gaz industriels
- 8 h pour la production de silicium et les usages thermiques en général.

Le scénario médian élaboré à partir de la part accessible moyenne de la puissance appelée conduit aux résultats suivants :

filière ou procédé	puissance appelée moyenne accessible (GW)	part accessible	puissance effaçable 1/2 h (GW)	puissance effaçable 2 h (GW)	puissance effaçable 8 h (GW)
fusion	0,24	85%	0,21	0,21	0,21
liquéfaction gaz industriels	0,09	20%	0,02	0,02	
électrolyse chlore	0,44	45%	0,20	0,10	0,04
fours hors fusion	0,16	50%	0,08	0,08	0,08
production de froid	0,20	80%	0,16	0,09	0,01
broyage	0,10	80%	0,08	0,08	0,02
chauffage locaux	0,04	50%	0,02	0,01	0,00
éclairage	0,12	25%	0,03	0,03	0,03
TOTAL			0,80	0,61	0,39

Les usages effaçables pour des durées d'effacement consécutives comprises entre 1 h 30 et 2 h pour un site conduisent à des potentiels d'effacement très largement réduits pour une durée longue (8 h), du fait de la nécessité du foisonnement pour atteindre une telle durée.

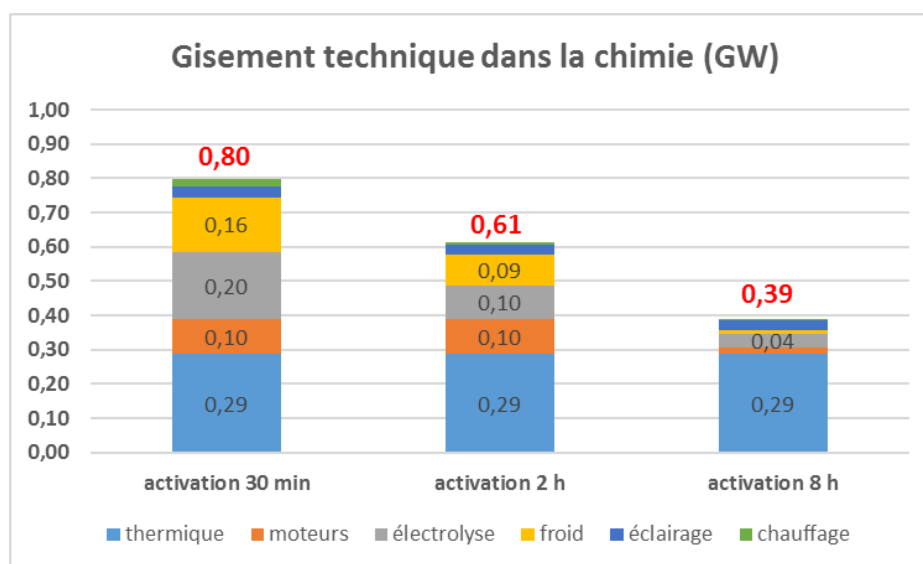


Figure 37 : Estimation du gisement technique dans la chimie

Les parts accessibles des usages effaçables ont fait l'objet d'une estimation basse et d'une estimation haute, ce qui conduit à :

- un gisement technique d'effacement à 30 minutes entre 0,7 et 0,9 GW (valeur médiane de 0,80 GW)
- un gisement technique d'effacement à 2 heures entre 0,5 et 0,7 GW (valeur médiane de 0,61 GW)

- un gisement technique d'effacement à 8 heures entre 0,3 et 0,45 GW (valeur médiane de 0,39 GW)

4.1.2.7. Le gisement technico-économique d'effacement de process

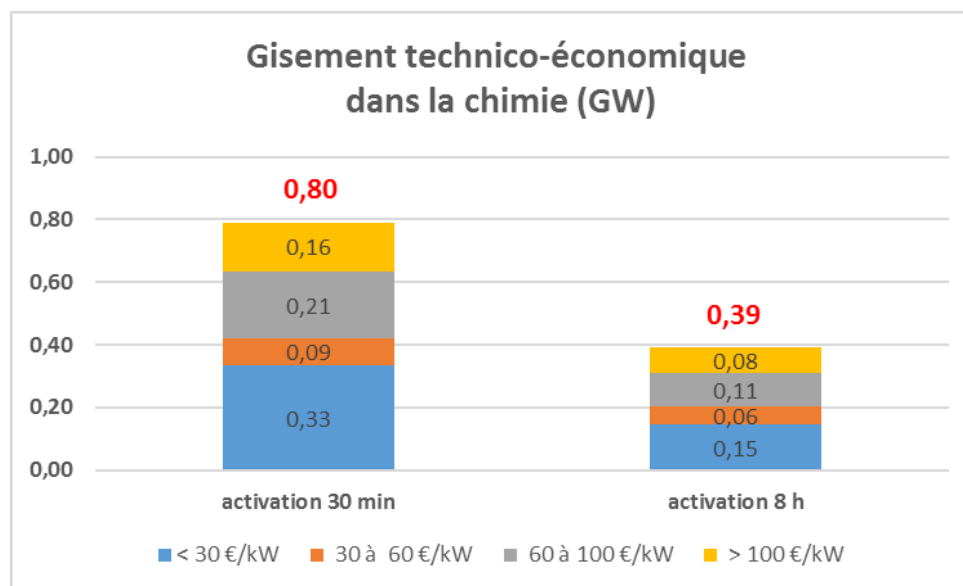


Figure 38 : Estimation du gisement technico-économique dans la chimie

Le gisement d'effacement est moyennement accessible (en regard des niveaux de rémunération actuels pratiqués), il est atteignable à un peu plus de 40% pour une rémunération de 30 €/kW, et à un peu plus de 50% pour une rémunération de 60 €/kW.

En prenant en compte un scénario bas qui allie des hypothèses basses pour le gisement technique et pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique est porté à 300 k€) et un scénario haut alliant des hypothèses hautes, notamment pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique passe de 200 à 100 k€), le gisement accessible à 30 €/kW est dans une fourchette de 0,2 à 0,5 GW.

À 60 €/kW, il se situe dans une fourchette de 0,3 à 0,7 GW.

4.1.3. Mécanique

4.1.3.1. Présentation du secteur

La mécanique comprend la fonderie et le travail des métaux (NCE 29), la construction mécanique (NCE 30), la construction électrique (NCE 31), la construction automobile (NCE 32) et la construction aéronautique et navale (NCE 33).

C'est un secteur peu concentré, avec près de 16 000 établissements. Sa consommation électrique est d'environ 22 TWh en 2013.

La puissance souscrite cumulée est d'environ 3,5 GW.

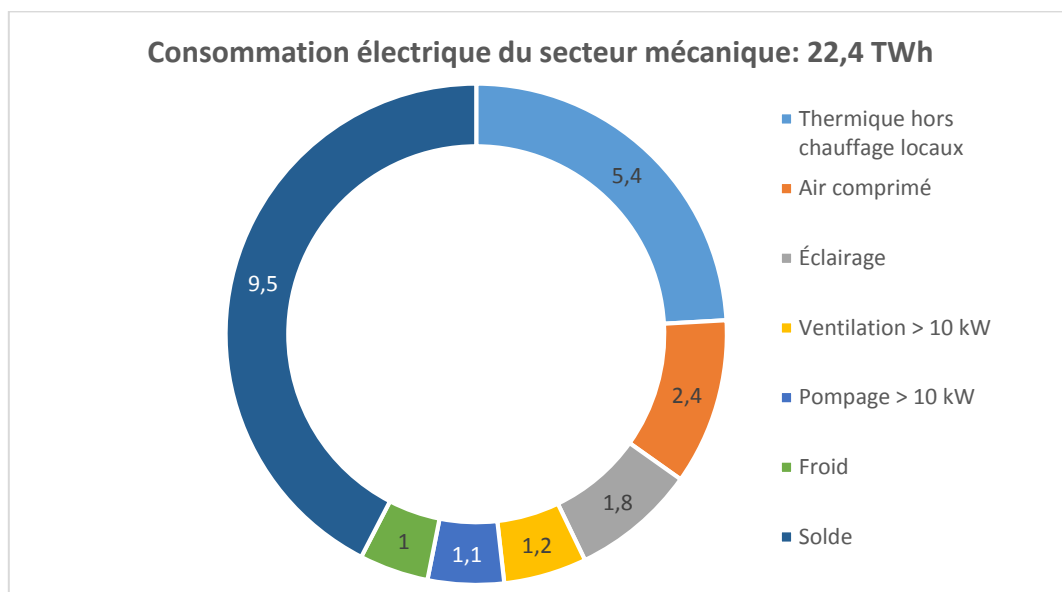


Figure 39 : Consommation électrique du secteur mécanique (CEREN, 2013)

La consommation à usage thermique représente 24% de la consommation électrique, l'éclairage 8%, le reste correspond à de la force motrice (68%).

Les besoins de la force motrice sont peu concentrés, ils concernent à peu près autant les utilités (production d'air comprimé et de froid, ventilation, pompage) que les usages process, comme l'outillage, l'usinage... (qui constituent le solde). La production d'air comprimé est de loin l'usage de force motrice le plus important.

Cette répartition est le résultat statistique de profils fortement différenciés. En effet, les fonderies ou les forges électriques utilisent l'électricité pour leurs usages thermiques de manière prédominante, tandis que d'autres sites de la mécanique n'ayant pas de besoins thermiques n'ont que des besoins de force motrice (et aussi d'éclairage).

Parmi les 5 secteurs NCE constituant la mécanique, la fonderie et le travail des métaux constituent le secteur le plus consommateur (35% de la mécanique), devant la construction électrique (22%) et l'automobile (20%) (Figure 40).

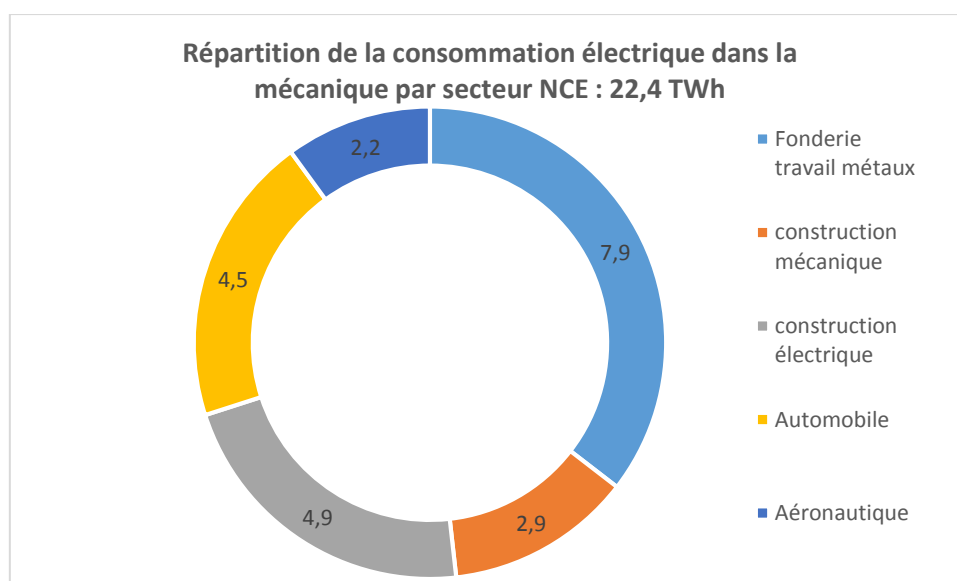


Figure 40 : Répartition de la consommation par sous-secteur

4.1.3.2. Variabilité de la consommation dans le temps

Les établissements sont très nombreux dans la mécanique, et notamment en régime de fonctionnement 1x8 h et 2x8 h.

Cependant, l'essentiel de la consommation (75 %) résulte de sites fonctionnant en 3x8 h avec ou non arrêt le week-end.

En moyenne, la durée de la puissance moyenne appelée est de 5200 h par an.

Il ne semble pas y avoir globalement de caractère saisonnier évident.

La consommation électrique au mois d'août chute de 30 à 50 % dans le secteur de la fonderie et le travail des métaux, dans la construction mécanique et dans l'automobile.

4.1.3.3. Les usages effaçables et les contraintes associées

En dehors des usages transverses effaçables, les entretiens réalisés ont mis en exergue des puissances effaçables dans les usages thermiques, notamment dans les fours de fusion des fonderies.

La fusion et plus généralement les usages thermiques

Elle est réalisée dans des fours à arc, ou bien dans des fours à induction.

Il peut y avoir des contraintes, notamment l'obligation de couler le métal liquide lorsque les moules arrivent.

Pour des effacements d'une durée minimale de 2 h, on peut envisager d'effacer également les auxiliaires, qui consomment environ 10 % de la consommation des fours, comme les filtres de dépoussiérage ou les pompes de refroidissement du four, mais de manière décalée par rapport à l'arrêt du four, d'au moins une demi-heure.

Autres opérations

D'autres opérations ont été indiquées comme « effaçables », en particulier l'électrolyse (pour le traitement de surface des métaux), la production de froid, le chauffage des locaux, qui n'est pas négligeable, et l'éclairage.

4.1.3.4. Les caractéristiques de l'effacement

- La puissance disponible est variable suivant les process, et le mode de fonctionnement des fours n'est pas toujours modulable. A titre d'exemple : une fonderie ayant répondu à un entretien donne deux allures de marche pour ses 2 fours de fusion :

Selon la période du cycle de fonctionnement du four, la puissance « effaçable » est donc très différente, et l'effacement peut être réalisé parfois par un décalage dans le temps du cycle de fusion.

- Selon les sites interrogés, les sollicitations d'effacement acceptables sont entre une demi-heure et une heure, et entre 1 et 3 h, avec un coût de perte de production fortement croissant (presque 5 fois supérieur pour un arrêt de 3 h par rapport à un arrêt d'une heure). Le délai possible d'activation peut varier entre 1 h 30 et 2 h. La répétitivité est jugée possible, à condition toutefois d'observer un délai minimum entre deux activations (de 8 h pour le premier site et de 12 h pour le second). Un industriel pourrait accepter d'être sollicité plusieurs fois, en tout cas 2 ou 3 fois par jour, si cela concerne des équipes ou des postes différents (par exemple, à 3h, à 11h et à 19h). L'effacement a pour conséquence une perte de production qui peut parfois être rattrapée dans le temps si le site est en surcapacité par rapport au marché actuel. Un site signale qu'il est limité par le nombre d'heures supplémentaires par

semaine qui seraient nécessaires pour compenser la production perdue lors de l'effacement. Les pertes de production ont été ainsi estimées par un industriel et sont d'environ 1000 € par MW effacé, pour une durée d'effacement de 2 h.

Des outils de délestage sur les procédés de fusion sont déjà disponibles (par exemple pour ne pas dépasser la puissance souscrite).

Les auxiliaires des fours (aspiration et captage des fumées, refroidissement du four) qui représentent environ 10% de la puissance des fours sont arrêtés avec un décalage d'une demi-heure à une heure après l'arrêt du four. Bien entendu, les contraintes sanitaires et de sécurité empêchent de les arrêter plus tôt.

Les usages du froid dans la mécanique sont principalement du refroidissement de machines, difficile à arrêter (à cause du risque de casse ou de dégradation de la machine), de la climatisation process, essentiellement dans les salles propres des sites d'électronique, qui pourrait être arrêtée grâce à l'inertie des salles propres pour une durée courte, jusqu'à une demi-heure, et le froid confort qui pourrait être arrêté de la même manière.

4.1.3.5. Freins et barrières au développement de l'effacement

Le secteur ne participe pas ou peu à l'effacement, seuls quelques industriels importants ont été sollicités par les différents acteurs de l'effacement à ce stade.

Il existe un potentiel de développement intéressant, mais avec plusieurs freins et barrières transmis lors des entretiens et qui sont décrits ci-après.

- **Un gisement limité par des contraintes métiers :**
 - La difficulté d'arrêter les auxiliaires de fours pour des raisons environnementales
 - L'intégration des process, notamment dans les fonderies, ayant pour conséquence qu'un arrêt des moyens de fusion entraîne l'arrêt de l'ensemble de la production et la mise en inactivité du personnel dans des délais de prévenance très courts et difficiles à gérer socialement
 - Des risques de dégradation (chocs thermiques, dégradation des réfractaires...) lors d'arrêts des moyens de production, notamment dans les fonderies et les forges,
 - Des process batch ayant des fluctuations importantes dans la journée (pour les fonderies)
 - La limitation des rejets de polluants

- **Un gisement limité par les pertes de production**

Si le site est en période de sous-activité, la production peut être rattrapée dans le temps, il n'y a pas de pertes de production.

Si ce n'est pas le cas, l'incapacité à fournir le client à temps n'est pas acceptable.

De nombreux sites de la mécanique sont des sous-traitants et sont dédiés à la moyenne et grande série (marché automobile, poids lourds...). Ils sont encore plus contraints par leurs obligations de services en flux tendus. Une interruption subie et non prédictible de leur production peut entraîner une perte de marché et d'éventuelles pénalités de retard chez les grands donneurs d'ordre internationaux.

- **Un gisement limité par l'organisation à mettre en place**

Il faut pouvoir mobiliser des équipes en heures supplémentaires pour rattraper la production perdue lors de l'effacement, avec des surcoûts et des limites réglementaires, et ce d'autant plus que la part de la main d'œuvre dans le prix d'une fabrication d'une pièce est importante (de 20 à 40%).

4.1.3.6. Le gisement technique d'effacement de process

Les hypothèses sectorielles pour calculer le gisement technique sont :

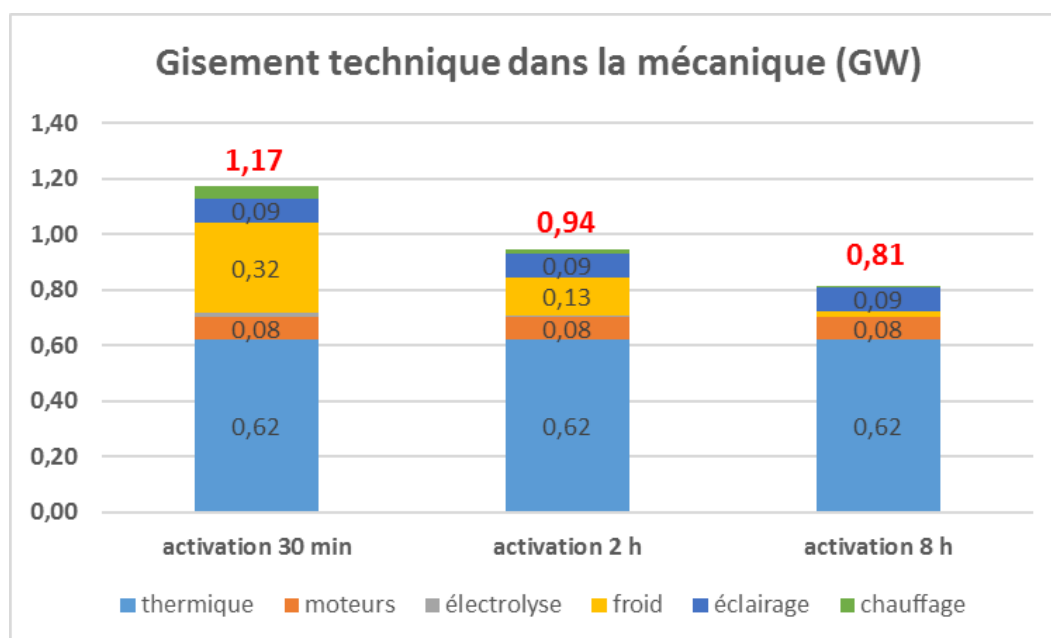
- une durée annuelle de 5200 h par an de fonctionnement (hors production de froid) ;
 - Une durée annuelle de 6000 h pour la climatisation process et 2000 h pour la climatisation confort).

La durée consécutive maximale d'effacement est variable suivant les applications :

- 0,5 h pour le froid process (salles propres essentiellement)
- 1 h pour l'électrolyse
- 8 h pour les fours, ainsi que leurs auxiliaires et les usages thermiques en général.

Le scénario médian élaboré à partir de la part effaçable moyenne de la puissance appelée conduit aux résultats suivants :

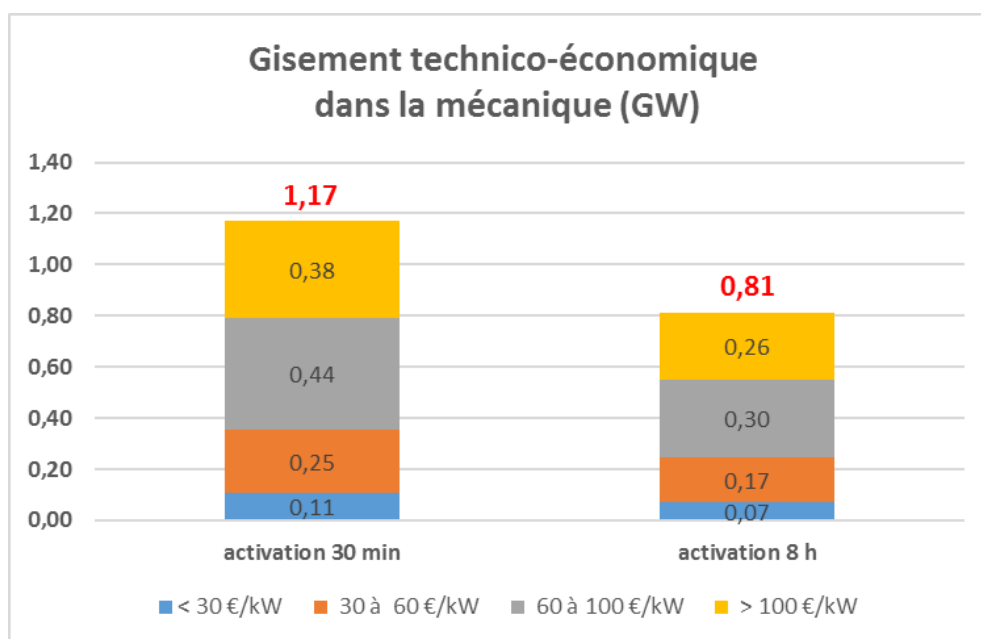
Les usages effaçables pour des durées comprises entre 30 minutes et 1 h (froid et chauffage des locaux) conduisent à des potentiels d'effacement largement réduits pour une durée moyenne (2 h), et plus encore pour une durée longue (8 h), du fait de la nécessité du foisonnement pour atteindre une telle durée.



Les parts accessibles des usages effaçables ont fait l'objet d'une estimation basse et d'une estimation haute, ce qui conduit à :

- un gisement technique d'effacement à 30 minutes entre 0,8 et 1,4 GW (valeur médiane de 1,17 GW)
- un gisement technique d'effacement à 2 heures entre 0,65 et 1,1 GW (valeur médiane de 0,94 GW)
- un gisement technique d'effacement à 8 heures entre 0,5 et 0,95 GW (valeur médiane de 0,81 GW).

4.1.3.7. Le gisement technico-économique d'effacement de process



Le gisement d'effacement est relativement peu accessible (en regard des rémunérations actuelles ou récentes), il est atteignable à moins de 10% pour une rémunération de 30 €/kW, et à 31% pour une rémunération de 60 €/kW.

En prenant en compte un scénario bas qui allie des hypothèses basses pour le gisement technique et pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique est porté à 300 k€) et un scénario haut alliant des hypothèses hautes, notamment pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique diminue de 200 à 100 k€), le gisement accessible à 30 €/kW est dans une fourchette de 0 à 0,4 GW.

À 60 €/kW, il se situe dans une fourchette de 0,1 à 0,7 GW.

4.1.4. Matériaux non métalliques

4.1.4.1. Présentation du secteur

Le secteur des matériaux comprend les minéraux divers (NCE 19), les ciments, plâtres et chaux (NCE 20), les autres matériaux de construction (NCE 21) et le secteur du verre (NCE 22).

Sa consommation électrique est d'environ 10 TWh en 2013.

La puissance souscrite cumulée est d'environ 2,2 GW.

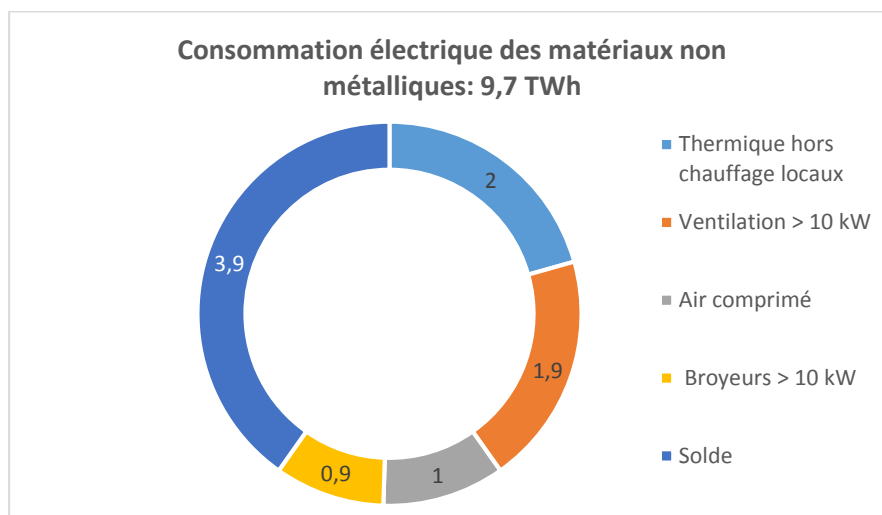


Figure 41 : Consommation électrique nationale du secteur matériaux non métalliques (CEREN, 2013)

La consommation à usage thermique représente environ 20% de la consommation électrique, le reste correspond à de l'éclairage (5%) et de la force motrice (74%).

Les besoins de force motrice sont concentrés à 50% dans la ventilation surtout, puis la production d'air comprimé et le broyage. Le solde correspond aux pompes, et à tous les moteurs de process à l'exclusion des broyeurs.

Cette répartition est le résultat statistique de profils différenciés. En effet, les usages thermiques de l'électricité sont nuls dans les cimenteries, les tuileries ou briqueteries, alors qu'ils peuvent être importants, voire prédominants dans des verreries ou des ateliers de céramique.

Parmi les 4 secteurs NCE constituant le secteur des matériaux et minéraux, le verre et les autres matériaux de construction sont les secteurs les plus consommateurs (respectivement 35% et 32% du total).

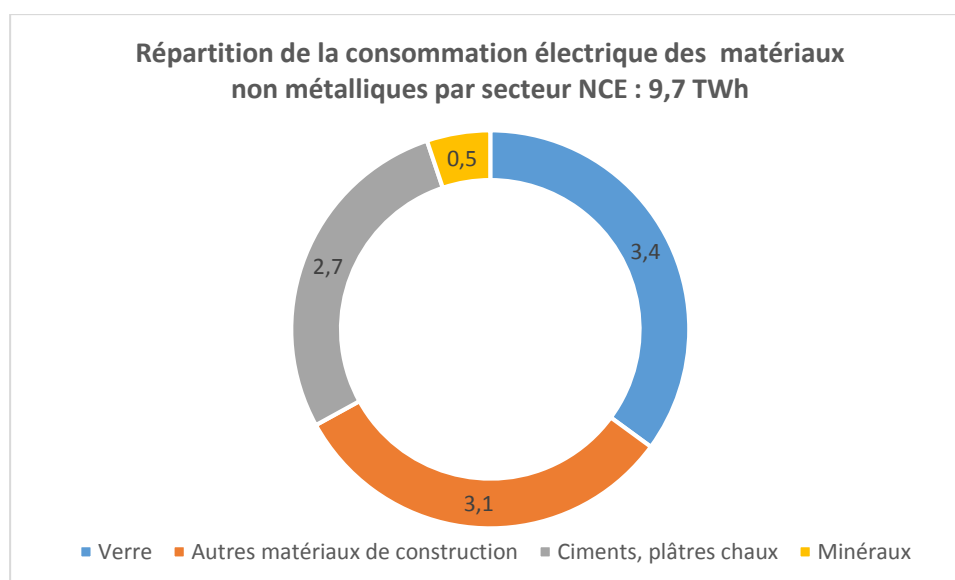


Figure 42 : Répartition de la consommation électrique du secteur des matériaux par secteur NCE

4.1.4.2. Variabilité de la consommation dans le temps

Les établissements dans ce secteur peuvent aussi bien fonctionner en 1x8 h, en 2x8 h (ils sont majoritaires dans le secteur des autres matériaux de construction), en 3x8 h avec arrêt le week-end et en 3x8 h sans arrêt le week-end.

Cependant, l'essentiel de la consommation (environ 85%) résulte de sites fonctionnant en 3x8 h avec ou non arrêt le week-end.

Pour les sites énérgo-intensifs comme les cimenteries et les verreries, la durée moyenne d'utilisation est d'environ 8000 h par an. Pour les usages thermiques hors fusion (cuisson, recuit...), la durée moyenne d'utilisation est moindre (environ 6000 h par an).

Il existe un caractère saisonnier dans le secteur des ciments plâtres et chaux qui est lié au caractère saisonnier du secteur du BTP : la consommation électrique en décembre est inférieure d'environ 20 % à la consommation moyenne, et celle de janvier est inférieure d'environ 50 %. On observe la même baisse en décembre pour les autres matériaux de construction, ainsi qu'une chute de plus de 30 % de la consommation en août.

Il ne semble pas y avoir globalement de caractère saisonnier dans le secteur du verre, ce sont des sites à feu continu.

4.1.4.3. Les usages effaçables et les contraintes associées

En dehors des usages transverses effaçables, les entretiens réalisés ont mis en exergue des puissances « effaçables » dans les usages thermiques, notamment dans les fours de fusion.

La fusion du verre et plus généralement les usages thermiques

La fusion du verre est réalisée dans des fours à combustibles avec boosting électrique (électrodes plongées dans le verre en fusion permettant d'obtenir une puissance thermique supérieure), ou dans des fours entièrement électriques à conduction.

La configuration des fours à brûleurs combustibles et en boosting électrique, fréquente dans la fabrication de verre creux, est propice à l'effacement, dans la mesure où l'arrêt de la consommation électrique ralentit le four mais ne l'arrête pas.

Par ailleurs, les fours de cuisson électriques dans la céramique fonctionnant selon des cycles batch sont susceptibles d'être effacés dans certaines conditions.

Pour des effacements d'une durée minimale de 2 h, on peut envisager d'effacer également les auxiliaires, qui consomment environ 10% de la consommation des fours, comme les filtres de dépoussiérage ou les pompes de refroidissement du four, mais de manière décalée par rapport à l'arrêt du four, d'au moins une demi-heure.

Le broyage du ciment

Les cimenteries ont la plupart du temps un atelier de production de clinker avec le four tournant de clinkérisation à haute température très difficile à arrêter et un atelier de production de ciment qui est obtenu par broyage d'ajouts divers avec le clinker.

Ce broyage final peut être interrompu, les cimenteries disposant d'un stockage de clinker.

4.1.4.4. Les caractéristiques de l'effacement

-Pour le broyage du ciment, le broyeur n'est pas toujours en fonctionnement, il peut être à l'arrêt, sa capacité de production étant supérieure aux besoins de ses clients. S'il est en fonctionnement, il peut être arrêté manuellement pendant une durée maximale de 8 h en hiver et de 2 h en été. Le site n'accepte pas une demande d'effacement plus qu'une fois par semaine en hiver et plus qu'une fois par mois en été.

Par ailleurs, on peut noter que la cimenterie est arrêtée 5 semaines en hiver.

Les délais d'activation d'effacement réalisables sont entre une demi-heure et une heure.

La durée minimale d'effacement est d'une heure, la durée maximale pourrait être de 8 h en fonction des commandes clients.

La répétitivité dans la journée n'est pas jugée possible. Il y a en effet des risques de pertes d'une coulée du verre.

4.1.4.5. Freins et barrières au développement de l'effacement

En dehors des cimenteries, l'ensemble du secteur ne participe pas ou peu à l'effacement.

Il existe un potentiel de développement relativement limité, avec certains freins et barrières transmis lors des entretiens et qui sont décrits ci-après.

- **Un gisement limité par des contraintes métiers :**

Il est difficile d'arrêter un four de cimenterie, le redémarrage étant une opération longue et coûteuse, du fait de son niveau de température et du réglage de la combustion avec des combustibles ayant parfois des PCI hétérogènes. De même, un four de fusion de verre fonctionne continûment jusqu'à une opération de maintenance lourde au bout de plusieurs années, il n'est donc pas possible de l'arrêter.

- **Un gisement limité par les pertes de production**

Si le site est en période de sous-activité, la production peut être rattrapée dans le temps, il n'y a pas de pertes de production, mais il faut prévoir des coûts supplémentaires de main d'œuvre, voire d'énergie (en cas de passage au gaz par exemple).

Il y a des contraintes techniques, comme celles de remplissage et de vidage des fours.

- **Un gisement limité par l'organisation à mettre en place ou des investissements**

Il faut pouvoir mobiliser des équipes en heures supplémentaires pour rattraper la production perdue lors de l'effacement, avec des surcoûts et des limites réglementaires (en droit du travail).

Pour le secteur verrier, il faut prévoir également des coûts d'investissement dans des capacités de stockage, le plus souvent inexistantes.

4.1.4.6. Le gisement technique d'effacement de process

Les hypothèses sectorielles pour calculer le gisement technique sont : une durée annuelle de 8000 h par an dans le secteur des matériaux et minéraux comme dans celui du verre, à l'exception des usages thermiques hors fusion et des usages transverses pour lesquels on a pris une durée moyenne de 6000 h par an.

La durée d'effacement potentielle est de 8 h pour les usages identifiés, tels que le broyage du ciment, le boosting des fours de fusion du verre (c'est-à-dire l'implantation d'électrodes dans des fours de fusion avec des brûleurs à gaz ou au fuel lourd), les autres usages thermiques (cuisson de céramique, recuit du verre...).

Le scénario médian élaboré à partir de la part accessible moyenne de la puissance appelée conduit aux résultats suivants :

filière ou procédé	puissance appelée moyenne accessible (GW)	part accessible	puissance effaçable 1/2 h (GW)	puissance effaçable 2 h (GW)	puissance effaçable 8 h (GW)
ciment (broyage)	0,13	90%	0,11	0,11	0,11
boosting fusion	0,06	100%	0,06	0,06	0,06
fabrication verre creux	0,06	100%	0,06	0,06	0,06
autres fours	0,03	100%	0,11	0,11	0,11
éclairage	0,08	25%	0,02	0,02	0,02
TOTAL			0,37	0,37	0,37

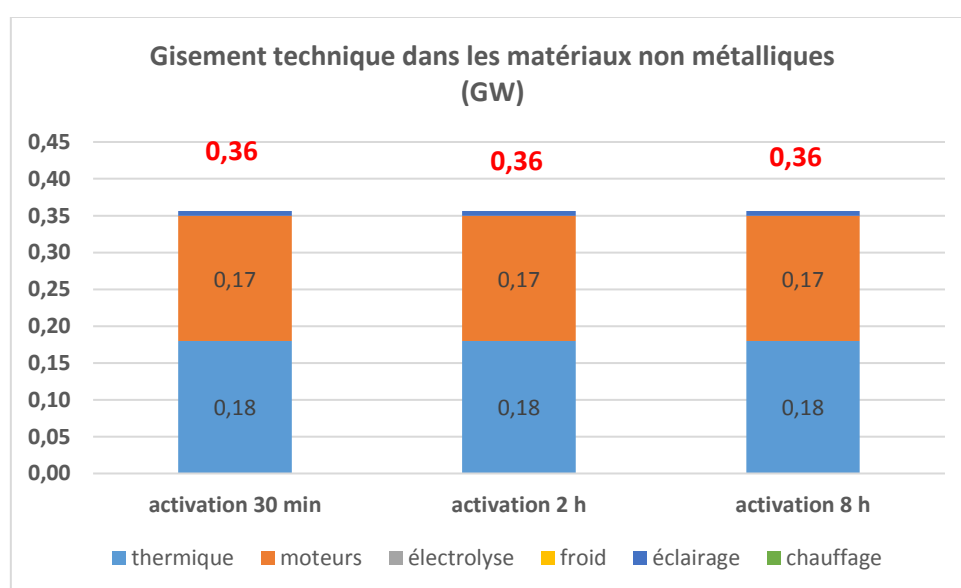


Figure 43 : Estimation du gisement technique dans le secteur des matériaux

Le gisement potentiel d’effacement est identique quelle que soit la durée d’effacement.

Les parts accessibles des usages effaçables ont fait l’objet d’une estimation basse et d’une estimation haute, ce qui conduit à :

- un gisement technique d’effacement entre 280 et 410 MW dans le secteur des matériaux non métalliques (valeur médiane à 360 MW).

4.1.4.7. Le gisement technico-économique d'effacement de process

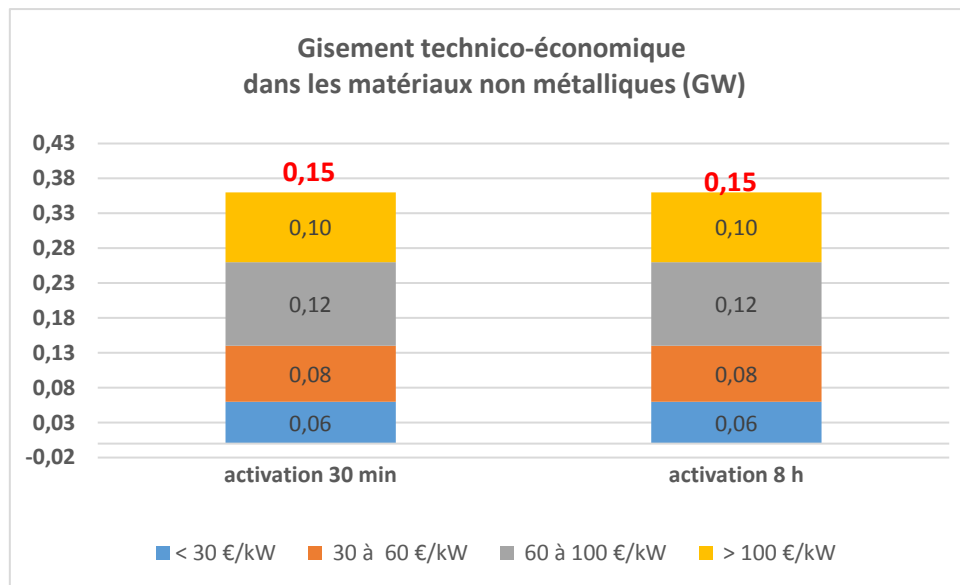


Figure 44 : Estimation du gisement technico-économique dans le secteur des matériaux

Le gisement d'effacement à 30 minutes (ainsi qu'à 8 h) est peu accessible (en regard des niveaux de rémunération actuels), il n'est que de 60 MW, soit 17% du total, pour une rémunération de 30 €/kW, et de 140 MW pour une rémunération de 60 €/kW.

En prenant en compte un scénario bas qui allie des hypothèses basses pour le gisement technique et pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique est porté à 300 k€) et un scénario haut alliant des hypothèses hautes, notamment pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique diminue de 200 à 100 k€), le gisement accessible à 30 €/kW est nul ou faible, dans une fourchette de 0 à 90 MW.

À 60 €/kW, il se situe dans une fourchette de 30 à 200 MW.

4.1.5. Plasturgie et caoutchouc

4.1.5.1. Présentation du secteur

Il comprend l'industrie du caoutchouc (NCE 36) et la plasturgie (NCE 37).

À l'exception de la fabrication de pneumatiques, c'est un secteur peu concentré, avec plus de 2000 établissements. Sa consommation électrique est d'environ 7 TWh en 2013.

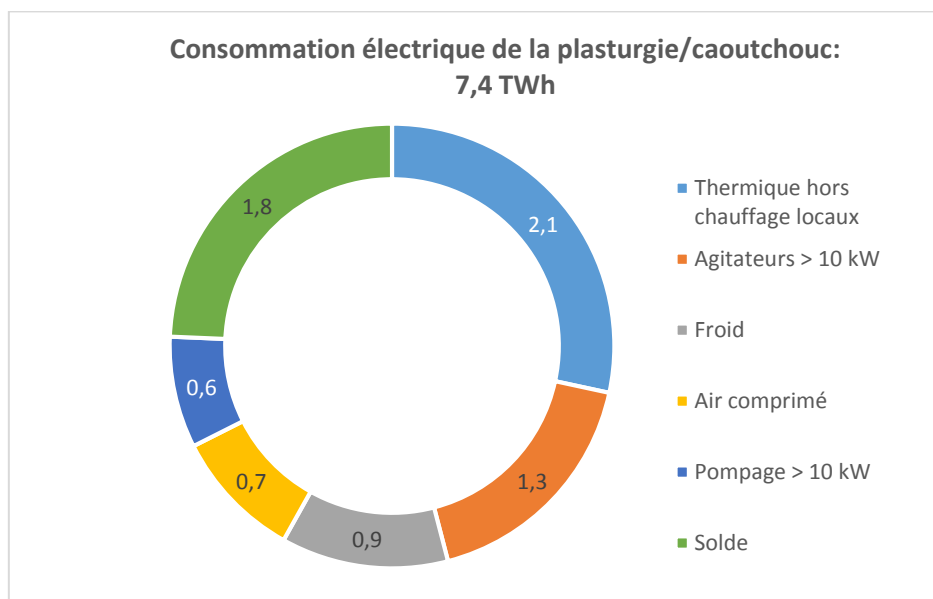


Figure 45 : Consommation électrique nationale de la plasturgie/caoutchouc (CEREN 2013)

La consommation à usage thermique représente un gros quart de la consommation électrique, l'éclairage 8%, le reste correspond à de la force motrice (68%).

Les besoins de la force motrice sont peu concentrés, ils concernent les utilités (production d'air comprimé et de froid, pompage...) et les usages process, en premier lieu les agitateurs/malaxeurs/mélangeurs/extrudeuses. Les usages thermiques de l'électricité sont rares.

La plasturgie est de loin le secteur le plus consommateur d'électricité, par rapport à l'industrie du caoutchouc.

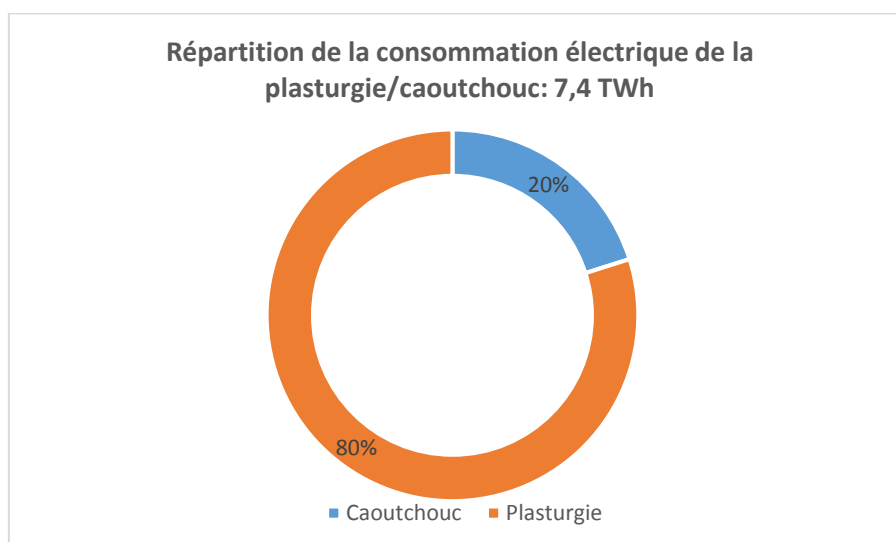


Figure 46 : Répartition de la consommation électrique de la plasturgie/caoutchouc

4.1.5.2. Variabilité de la consommation dans le temps

Les établissements fonctionnent avec des régimes de fonctionnement continus ou quasi continus (arrêt le week-end), mais également en 2x8h ou 1x8h.

Cependant, près de 95% de la consommation résultent de sites fonctionnant en 3x8 h avec ou non arrêt le week-end, avec un partage moitié moitié entre ceux qui ne s'arrêtent pas en fin de semaine et ceux qui s'arrêtent.

La durée de la puissance moyenne appelée est de 6500 h par an.

Il ne semble pas y avoir globalement de caractère saisonnier, malgré une chute de la consommation électrique au mois d'août d'environ 30 à 40 % aussi bien dans l'industrie du caoutchouc que dans la plasturgie.

4.1.5.3. Les usages effaçables et les contraintes associées

Les entretiens réalisés ont mis en exergue des puissances « effaçables » :

1) dans les utilités : en particulier la production de froid qui sert essentiellement au refroidissement des machines. Le froid confort et l'éclairage ont également été indiqués comme effaçables.

2) dans les procédés, notamment dans le chauffage de la matière première dans les lignes d'extrusion ou les presses à injection.

L'indépendance des lignes de fabrication des sites (14 lignes dans un site interrogé, 5 dans un autre) donne une certaine souplesse au site. De plus, ces lignes fabriquent des produits intermédiaires (rouleau par exemple) qui sont stockés avant d'être envoyés vers les lignes d'usinage et de finition. En fonction des niveaux de stockage de produits intermédiaires, une ou plusieurs lignes d'extrusion peuvent donc être temporairement arrêtées

Plusieurs contraintes limitent les capacités d'effacement :

- Les délais très courts (par exemple 3 jours pour un site interrogé) de livraison des clients, impactant le niveau de stockage ;
- Les températures minimales à maintenir sur les procédés, par exemple 80°C pour une ligne d'extrusion fonctionnant à 180°C ;
- Les durées pour arrêter et démarrer les lignes de production (de 2 à 6 heures).

4.1.5.4. Les caractéristiques de l'effacement

Pour les lignes d'extrusion, leur puissance est estimée entre 30 et 40 % de la puissance électrique du site. Comme il faut les maintenir à une température minimale, la puissance effaçable correspond à environ 75% de la puissance appelée moyenne.

Les sollicitations d'effacement acceptables sont la veille pour le lendemain, avant si possible.

Le délai possible d'activation est entre 2 h et 3 h, la durée de 3 h permettant d'affecter l'opérateur de la ligne ailleurs. La durée maximale d'effacement pourrait aller jusqu'à une journée.

La répétitivité n'est pas jugée possible pour un site interrogé.

Les deux sites interrogés n'ont pas de dispositif de pilotage de leurs consommations, même s'ils disposent d'un système de mesurage, de suivi et de contrôle de leurs consommations. L'effacement se ferait donc manuellement.

Pour les auxiliaires des fours (aspiration et captage des fumées, refroidissement du four) : ils représentent environ 10% de la puissance totale des fours. Du fait des contraintes sanitaires et de sécurité, les auxiliaires ne peuvent être arrêtés qu'avec un décalage (d'une demi-heure à une heure) après l'arrêt du four.

Pour les usages du froid,

- le refroidissement de machines (principale usage du froid dans le secteur), est difficile à arrêter
- le froid confort pourrait être arrêté pour une courte durée (jusqu'à une demi-heure) en utilisant l'inertie thermique des locaux.

4.1.5.5. Freins et barrières au développement de l'effacement

Le secteur ne participe pas ou peu à l'effacement.

Il existe cependant un potentiel de développement relativement important, avec certains freins et barrières transmis lors des entretiens et qui sont transcrits ci-après.

- **Un gisement limité par des contraintes métiers :**

Le temps d'arrêt et de redémarrage des lignes (estimé entre 2 h et 6 h)

La nécessité de maintenir les lignes à une température minimale, ce qui amoindrit la puissance effaçable et entraîne une surconsommation énergétique

La production de déchets pas forcément recyclables lors d'un arrêt, ce qui entraîne leur expédition dans des décharges de classe 1.

- **Un gisement limité par le niveau des stocks**

Le stockage de produits intermédiaires est actuellement limité à une journée. L'augmentation du niveau de stockage ne s'inscrit pas dans la tendance de la profession (et de l'industrie en générale) qui vise à produire en juste à temps avec un minimum de stocks, voire pas de stock du tout.

- **Un gisement limité par l'organisation à mettre en place**

Le rattrapage de la production perdue lors de l'effacement demande une mobilisation des équipes en heures supplémentaires, avec des surcoûts et des limites réglementaires (en termes d'heures de travail).

4.1.5.6. Le gisement technique d'effacement de process

Il est calculé à partir de la consommation par usage du secteur.

La puissance moyenne appelée a été estimée à partir de la consommation annuelle en prenant en compte une durée annuelle de 6500 h par an, y compris pour la production de froid process.

La durée d'effacement potentielle est de 8 h pour les usages thermiques et leurs auxiliaires.

Le scénario médian élaboré à partir de la part accessible moyenne de la puissance appelée conduit aux résultats suivants :

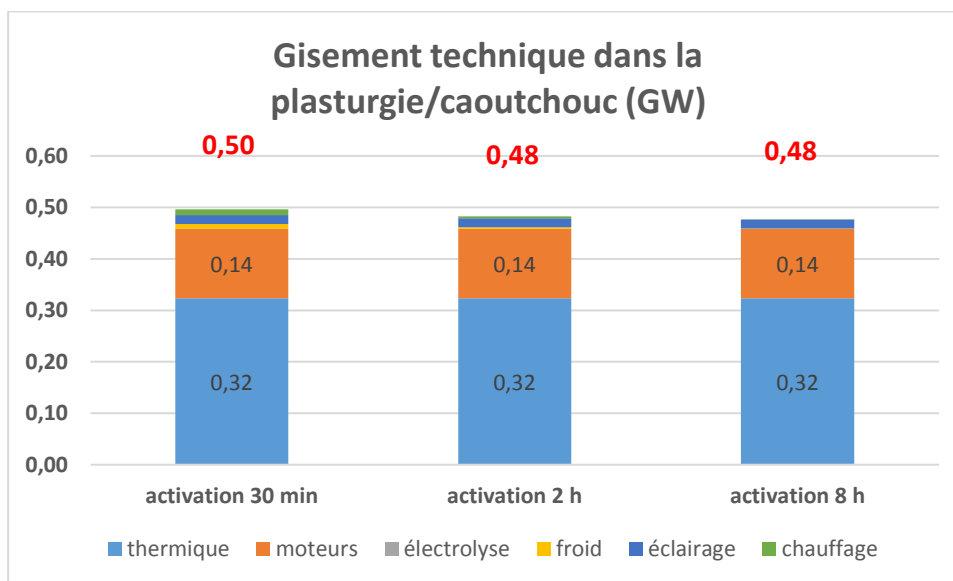


Figure 47 : Estimation du gisement technique dans la plasturgie/caoutchouc

Les parts accessibles des usages effaçables ont fait l'objet d'une estimation basse et d'une estimation haute, ce qui conduit à **un gisement technique d'effacement à 30 minutes entre 0,35 et 0,5 GW, quasiment identique à des durées de 2 heures et 8 heures.**

4.1.5.7. Le gisement technico-économique d'effacement de process

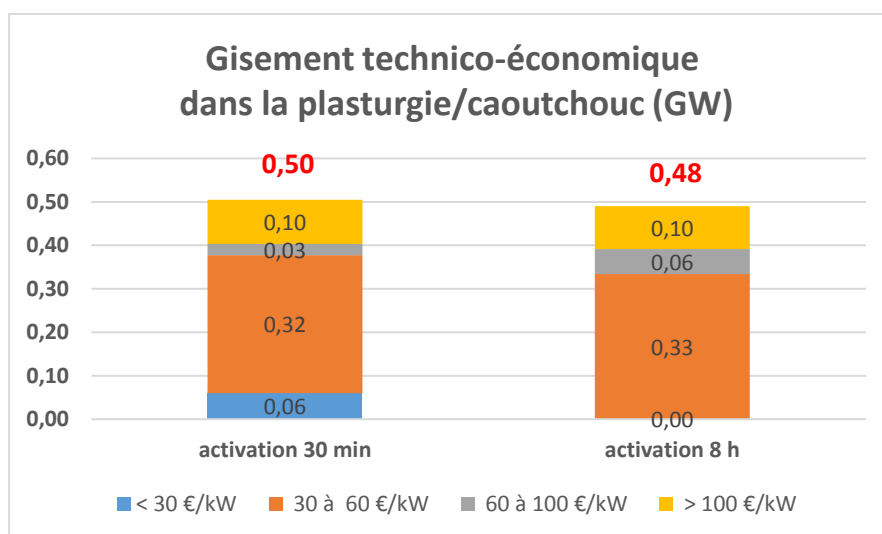


Figure 48 : Estimation du gisement technico-économique dans la plasturgie/caoutchouc

Le gisement d'effacement est moyennement accessible (en regard des niveaux de rémunération actuels), il est atteignable à un peu plus de 10% pour une rémunération de 30 €/kW, et à environ 75% pour une rémunération de 60 €/kW.

En prenant en compte un scénario bas qui allie des hypothèses basses pour le gisement technique et pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique est porté à 300 k€) et un scénario haut alliant des hypothèses hautes, notamment pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique diminue de 200 à 100 k€), le gisement accessible à 30 €/kW est dans une fourchette de 0 à 0,1 GW.

À 60 €/kW, il se situe dans une fourchette de 20 MW à 0,4 GW.

4.1.6. Papier

4.1.6.1. Présentation du secteur

Le code NCE du secteur est 35.

À l'exception de la fabrication de pâte à papier, le secteur est peu concentré, surtout dans le domaine de la transformation du papier.

Sa consommation électrique est de 9,5 TWh en 2013, dont environ 80% dans les APE 1711Z et 1712Z qui correspondent à la fabrication de pâte à papier, de papier et de carton.

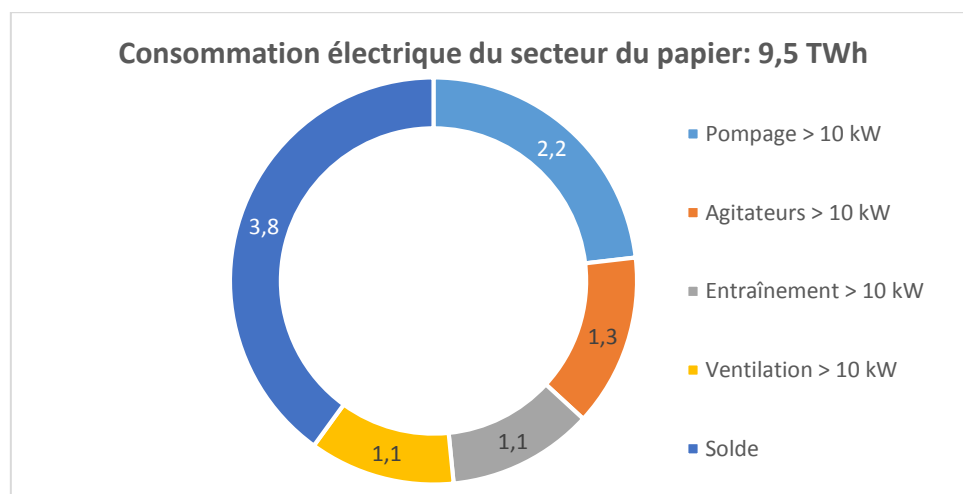


Figure 49 : Consommation électrique nationale du secteur du papier (CEREN 2013)

La consommation électrique est à plus de 95% pour l'usage force motrice, les usages thermiques et l'éclairage ne représentant chacun que 2% de la consommation. Le profil électrique des papeteries en termes de besoins est assez homogène. Il faut toutefois noter que certaines papeteries disposent de moyens de production d'électricité, ce qui a des conséquences sur le profil de leurs achats d'électricité.

La production électrique dans le secteur est estimée à 1,5 TWh, soit 15% de la consommation électrique.

Les besoins de la force motrice concernent les utilités (pompage et ventilation en premier lieu, la production d'air comprimé et de froid étant faiblement consommatrices) et plus encore les usages process, notamment les agitateurs/malaxeurs/mélangeurs/extrudeuses et les moteurs d'entraînement (surtout pour les machines à papier).

4.1.6.2. Variabilité de la consommation dans le temps

À l'exception de la transformation du papier, les établissements fonctionnent avec des régimes de fonctionnement continus.

Toutes les papeteries fonctionnent en 3x8 h sans arrêt le week-end, la durée de la puissance moyenne appelée des équipements est de 8000 h par an (source CTP et CEREN).

Il ne semble pas y avoir de caractère saisonnier, il n'y a pas comme dans la plupart des secteurs une chute de la consommation électrique au mois d'août. Pourtant, l'un des deux sites interrogés indique un arrêt ponctuel en août, ce qui peut s'expliquer par des travaux de maintenance.

Le profil annuel de la consommation du secteur est plat.

4.1.6.3. Les usages effaçables et les contraintes associées

En dehors des usages transverses effaçables, les entretiens réalisés ont mis en exergue des usages effaçables et ayant déjà fait l'objet d'effacements dans la production de pâte à papier mécanique et de pâte de récupération, ainsi que dans la production de papier.

Une papeterie intégrée ou fabriquant sa pâte à partir de vieux papiers peut effacer son atelier de production de pâte sans arrêter sa machine à papier si elle dispose d'un stock suffisant de pâte. En revanche, la production de pâte chimique est plus difficile à arrêter, dans la mesure où elle fournit en continu de la liqueur noire brûlée dans les chaudières alimentant des turbines à vapeur fonctionnant en cogénération. L'arrêt de la production de pâte entraînerait un arrêt de la production électrique (et de vapeur).

Par ailleurs, pour certains papiers à forte valeur ajoutée (papiers graphiques haut de gamme, papiers fiduciaires, papiers stériles pour usage médical...), il n'est pas économique (dans les conditions actuelles de rémunération) d'arrêter la machine à papier.

Par ailleurs, il faut tenir compte des risques liés au redémarrage des lignes de production et du temps nécessaire pour repasser au régime nominal :

- 10 à 12 minutes pour la pâte mécanique vierge
- 45 minutes pour la pâte désencrée,
- De 6 à 8 h pour la machine à papier (par exemple pour 6 heures de redémarrage : 3 h de préparation et 3 h de mise au point).

4.1.6.4. Les caractéristiques de l'effacement

La papeterie interrogée pratiquant l'effacement le fait manuellement pour les appels d'offre ou pour la réserve rapide, et en pilotage automatique pour l'interruptibilité.

Les délais de mobilisation et d'activation sont très faibles, de quelques minutes.

Plus la durée d'effacement demandée est longue, plus la puissance effacée est réduite.

Une certaine souplesse de production est possible selon le nombre de lignes de production (pâte vierge, unités de pâte désencrée et machines à papier). En revanche, on ne peut pas moduler la puissance des machines à papier qui fonctionnent en mode tout ou rien.

La durée maximale d'effacement pourrait aller jusqu'à 8 h.

La répétitivité est jugée possible, c'est la durée cumulée d'effacement qui reste limitée.

4.1.6.5. Freins et barrières au développement de l'effacement

Le secteur pratique l'effacement. Il concerne cependant un nombre limité de sites gros consommateurs.

Il existe cependant un potentiel de développement relativement important, avec certains freins et barrières transmis lors des entretiens et qui sont transcrits ci-après.

- **Un gisement limité par des contraintes techniques :**

Le temps d'arrêt et de redémarrage des machines à papier longs : il a été estimé entre 6 h et 8 h

Les risques de casse de papier non négligeables et des contraintes importantes lors du redémarrage

- **Un gisement limité par le niveau des stocks**

Afin de faciliter la réalisation d'effacements, il faudrait augmenter le stockage de produits intermédiaires actuellement limité, ce qui ne s'inscrit pas dans la tendance de la profession qui vise à produire en juste à temps avec un minimum de stocks, voire pas de stock du tout.

- **Un gisement limité par le taux élevé des capacités de production**

Le fonctionnement des papeteries étant continu, la production perdue peut être rattrapée seulement si l'installation fonctionne à charge réduite.

- **Un gisement limité par l'organisation à mettre en place**

Le rattrapage de la production perdue lors de l'effacement demande une mobilisation des équipes en heures supplémentaires, avec des surcoûts et des limites réglementaires (en termes d'heures de travail).

- **Un gisement limité par le risque client**

Certains papiers sont fortement personnalisés et doivent être produits dans un temps très court, interrompre la production peut avoir pour conséquence de perdre un marché et de détériorer une relation commerciale.

4.1.6.6. Le gisement technique d'effacement de process

Il est calculé à partir de la consommation par usage du secteur.

On est passé de la consommation annuelle à la puissance moyenne appelée en prenant en compte une durée annuelle de 8000 h par an.

La durée d'effacement potentielle est de 8 h pour la production de pâte et la production de papier.

Le scénario médian élaboré à partir de la part accessible moyenne de la puissance appelée conduit aux résultats suivants :

Filière	Puissance appelée moyenne accessible (GW)	Part accessible	Puissance effaçable 1/2 h (GW)	Puissance effaçable 2 h (GW)	Puissance effaçable 8 h (GW)
Fabrication pâte mécanique / désencrée	0,21	100%	0,21	0,21	0,21
Fabrication de papier	0,65	80%	0,52	0,52	0,52
Eclairage	0,03	25%	0,01	0,01	0,01
TOTAL	0,89		0,74	0,74	0,74

Figure 50 : Ratios de puissance effaçable dans l'industrie papetière

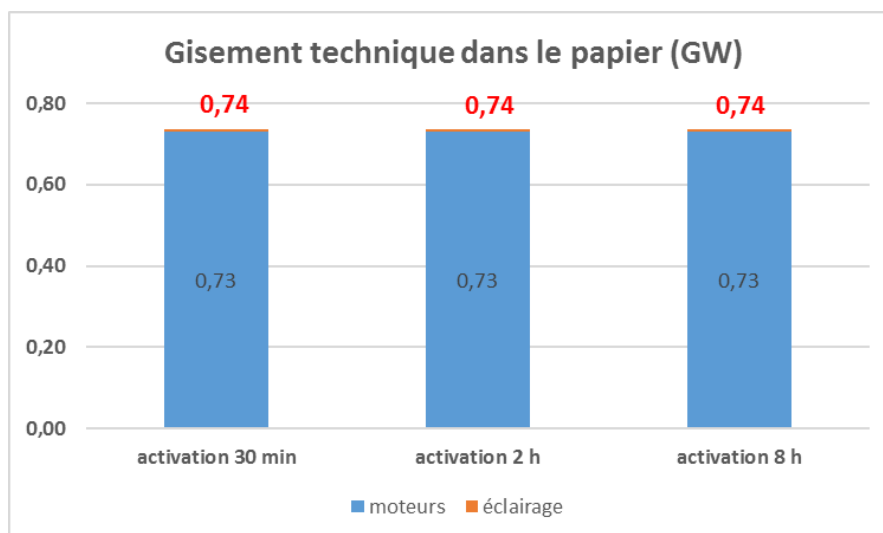


Figure 51 : Gisement technique t dans l'industrie papetière

Les parts accessibles des usages effaçables ont fait l'objet d'une estimation basse et d'une estimation haute, ce qui conduit à **un gisement technique d'effacement à 30 minutes entre 0,55 et 0,9 GW, identique à des durées de 2 heures et 8 heures.**

4.1.6.7. Le gisement technico-économique d'effacement de process

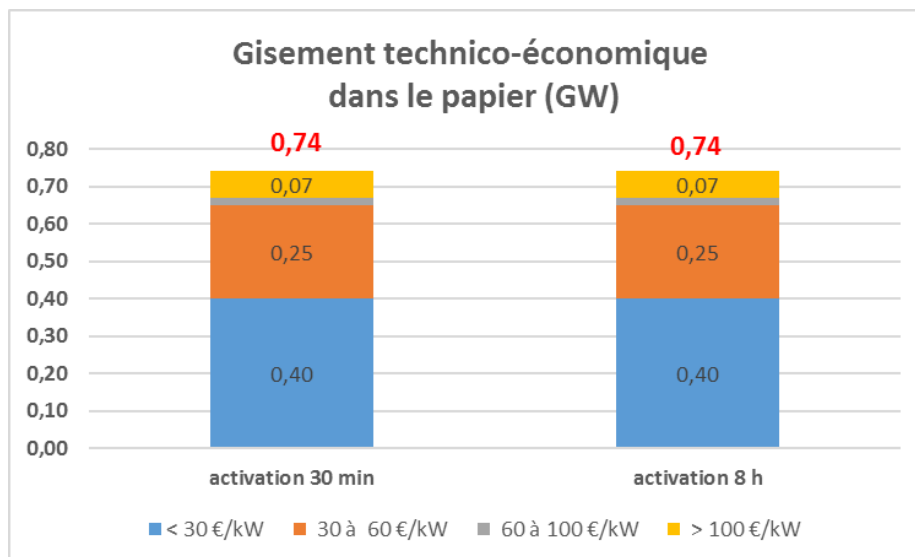


Figure 52 : Estimations du gisement technico-économique dans l'industrie papetière

Le gisement d'effacement est relativement accessible (en regard des niveaux de rémunération actuels), il est atteignable à un peu plus de 50% pour une rémunération de 30 €/kW, et à plus de 85% pour une rémunération de 60 €/kW.

En prenant en compte un scénario bas qui allie des hypothèses basses pour le gisement technique et pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique est porté à 300 k€) et un scénario haut alliant des

hypothèses hautes, notamment pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique diminue de 200 à 100 k€), le gisement accessible à 30 €/kW est dans une fourchette de 0,32 à 0,74 GW.

À 60 €/kW, il se situe dans une fourchette de 0,57 GW à 0,82 GW.

4.1.7. Agro-alimentaire

4.1.7.1. Présentation du secteur

L'agro-alimentaire comprend 3 secteurs NCE :

- L'industrie laitière (NCE 12)
- L'industrie sucrière (NCE 13)
- L'agro-alimentaire hors lait et hors sucre (NCE 14)

À l'exception de l'industrie sucrière et de celle des produits amylacés (sous-secteur de la NCE 14), l'agro-alimentaire est un secteur très peu concentré, avec presque 5000 sites. Sa consommation électrique est d'environ 21 TWh en 2013.

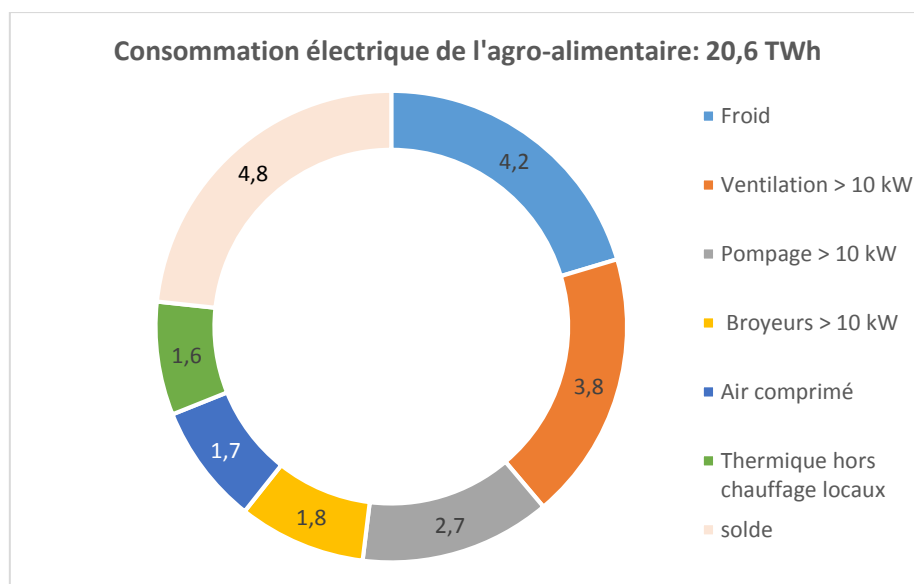


Figure 53 : Consommation électrique nationale du secteur agro-alimentaire (CEREN, 2013)

La consommation à usage thermique représente 8% de la consommation électrique, l'éclairage 4%, le chauffage des locaux 1,5%, le reste correspond à de la force motrice (87%).

Les besoins de la force motrice concernent surtout les utilités (70%), et en premier lieu la production de froid, puis la ventilation, le pompage et la production d'air comprimé.

Pour les usages process, le seul poste important est celui du broyage concassage.

Cette répartition est le résultat statistique de profils différents, avec toutefois une particularité qui est l'importance des besoins de froid en dehors de l'industrie sucrière, et de quelques produits comme les biscuits, les pâtes alimentaires ...

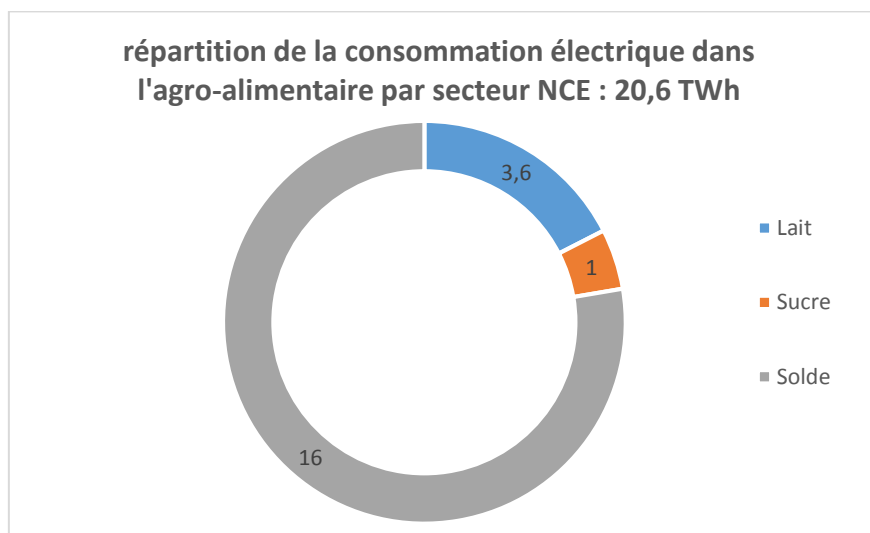


Figure 54 : Répartition de la consommation électrique nationale de l'agro-alimentaire par secteur NCE (CEREN, 2013)

4.1.7.2. Variabilité de la consommation dans le temps

Les établissements fonctionnent avec des régimes de fonctionnement variables, du continu ou quasi continu (arrêt le week-end) au 2x8h ou 1x8h.

Même si un peu plus de la moitié de la consommation provient des sites fonctionnant en 3x8 h sans arrêt le week-end, la contribution de chacun des 4 principaux rythmes de fonctionnement à la puissance moyenne est importante.

La durée de la puissance moyenne appelée est de 5800 h par an.

Comme il s'agit d'une industrie de transformation de produits agricoles, le caractère saisonnier est marqué, tout au moins dans certains secteurs, comme l'industrie sucrière et le secteur des conserves.

4.1.7.3. Les usages effaçables et les contraintes associées

En dehors des usages transverses effaçables, les entretiens réalisés n'ont pas mis en exergue des usages effaçables, à l'exception d'usages particuliers en bi énergie, c'est-à-dire d'usages pouvant fonctionner avec deux énergies différentes.

En fait, c'est surtout la production de froid qui peut être effacée grâce notamment à l'inertie thermique des chambres froides ou des locaux climatisés. Le secteur de la viande qui a des besoins de froid particulièrement importants est un secteur propice à l'effacement.

D'autres opérations ont été indiquées comme effaçables : le froid confort, et l'éclairage.

4.1.7.4. Les caractéristiques de l'effacement

La puissance de la production de froid est très variable d'un site à un autre, de quelques % jusqu'à 80 % de la puissance moyenne appelée (par exemple pour un site de charcuterie industrielle interrogé).

La température de consigne des chambres froides ou des ateliers de climatisation se situe entre 1 °C et 2 °C, ce qui laisse la possibilité de couper l'alimentation du froid durant : 2 à 3 h en été,

3 à 4 h (voire plus en fonction de la configuration des sites) en hiver.

Les sollicitations d'effacement acceptables sont très variables : de la veille jusqu'à la semaine en fonction de l'ordonnancement de la production.

La répétitivité n'est pas jugée possible dans la majorité des cas.

L'automatisation des usines semble assez développée, certains sites disposent d'une GTC. Un site interrogé a la particularité de posséder un optimiseur qui a pour fonction d'éviter de dépasser la puissance souscrite, cet outil pourrait être utilisé pour piloter automatiquement un effacement.

4.1.7.5. Freins et barrières au développement de l'effacement

Le secteur ne participe pas ou peu à l'effacement.

Il existe cependant un potentiel de développement, avec certains freins et barrières qui nous ont été transmis lors des entretiens et qui sont décrits ci-après.

- **Un gisement limité par des contraintes métiers :**

La réception de la matière première qui est le plus souvent périssable, par exemple le lait qu'il convient de traiter aussitôt pour des contraintes d'hygiène.

Pour les usages du froid, la nécessité de maintenir les chambres froides ou les ateliers de climatisation à une température minimale, ou de respecter une tolérance sur la température de consigne, ce qui limite la durée d'effacement possible, surtout quand il fait chaud, en période estivale.

- **Un gisement limité par l'inexistence apparente de stockage de froid :** C'est une technique encore peu mature et coûteuse et qui nécessite de l'espace.

- **Un gisement limité par l'organisation à mettre en place**

Les sites répondent généralement à un ordonnancement de production réalisé pour plusieurs semaines, et qu'il est difficile de modifier ou adapter. Il faut pouvoir mobiliser des équipes en heures supplémentaires pour rattraper la production perdue lors de l'effacement, avec des surcoûts et des limites réglementaires.

- **Un gisement limité par les contraintes sanitaires très fortes :** Un effacement peut générer des pertes de production importantes, et un éventuel décalage de la production pourrait se faire au détriment de la date limite de consommation.

4.1.7.6. Estimation du gisement technique d'effacement de process

Il est calculé à partir de la consommation par usage du secteur.

La puissance moyenne appelée a été estimée à partir de la consommation annuelle en prenant en compte une durée annuelle de 5800 h dans l'agro-alimentaire hors secteur du sucre, à l'exception des usages transverses, en particulier les chambres froides pour lesquelles il a été pris l'hypothèse d'une durée de 8000 h par an et le froid pour la climatisation process pour laquelle l'hypothèse considérée est d'une durée de 6000 h par an.

La durée d'effacement potentielle est de 8 h pour les usages thermiques (notamment les fours de cuisson), tandis qu'elle n'est que de 2 h pour les chambres froides et pour le froid process.

Le scénario médian élaboré à partir de la part accessible moyenne de la puissance appelée conduit aux résultats suivants :

filière	puissance appelée moyenne accessible (GW)	part accessible	puissance effaçable 1/2 h (GW)	puissance effaçable 2 h (GW)	puissance effaçable 8 h (GW)
thermique	0,28	60%	0,17	0,17	0,17
froid chambres froides	0,16	100%	0,16	0,16	0,02
froid climatisation process	0,17	80%	0,13	0,13	0,02
chauffage locaux	0,07	50%	0,03	0,01	0,00
éclairage	0,16	25%	0,04	0,04	0,04
TOTAL			0,53	0,51	0,25

Figure 55 : Ratios de puissance effaçable IAA

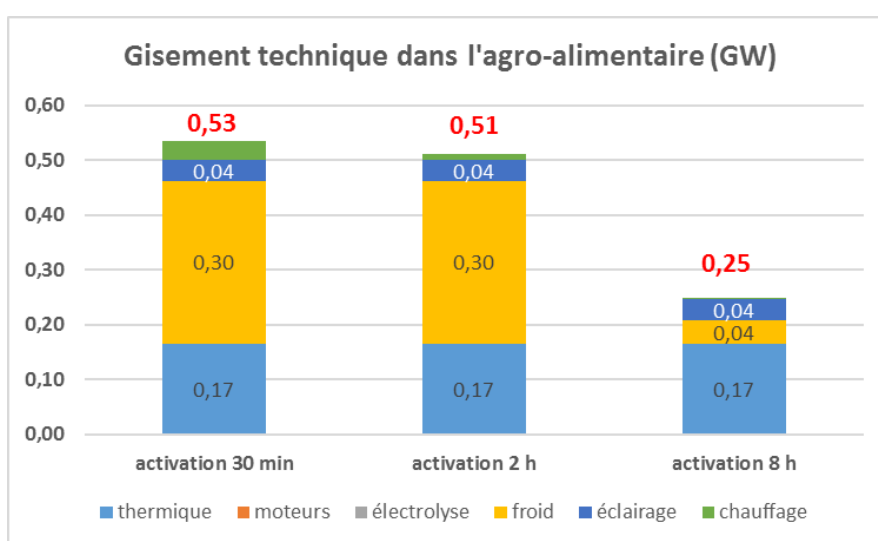


Figure 56 : Estimations du gisement technique dans l'agro-alimentaire

Le gisement potentiel d'effacement diminue sensiblement entre 2 h et 8 h, du fait principalement de l'usage froid qui nécessite un foisonnement au-delà de 2 h.

Les parts accessibles des usages effaçables ont fait l'objet d'une estimation basse et d'une estimation haute, ce qui conduit à :

- un gisement technique d'effacement à 30 minutes entre 410 et 640 MW (valeur médiane à 530 MW)
- un gisement technique d'effacement à 2 heures entre 400 et 610 MW (valeur médiane à 510 MW)
- un gisement technique d'effacement à 8 heures entre 200 et 320 MW (valeur médiane à 250 MW)

4.1.7.7. Estimation du gisement technico-économique d'effacement de process

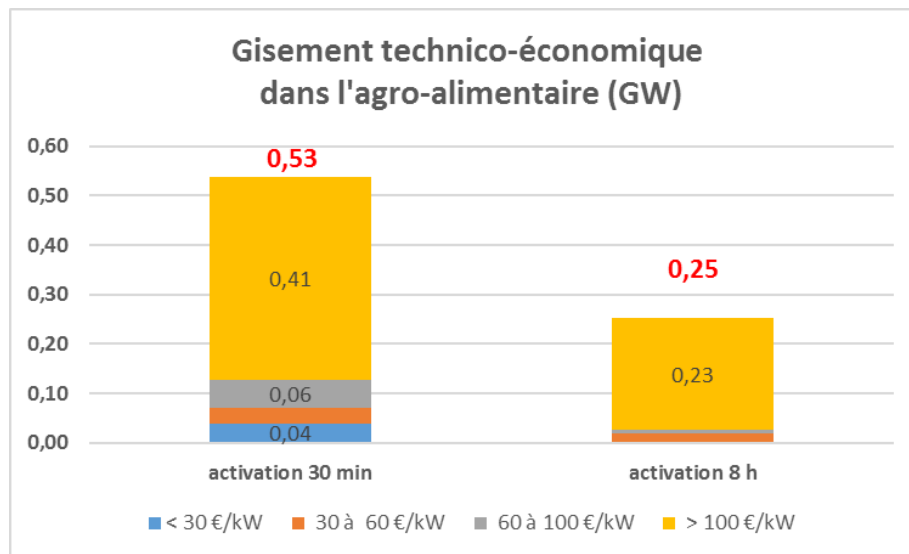


Figure 57 : Estimations du gisement technico-économique dans l'agro-alimentaire

Le gisement d'effacement à 30 minutes est très peu accessible, il n'est que de 40 MW, soit 8% du total, pour une rémunération de 30 €/kW, et de 70 MW pour une rémunération de 60 €/kW.

Pour une durée de 8h, il est encore moins accessible : 20 MW pour une rémunération de 60 €/kW.

En prenant en compte un scénario bas qui allie des hypothèses basses pour le gisement technique et pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique est porté à 300 k€) et un scénario haut alliant des hypothèses hautes, notamment pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique diminue de 200 à 100 k€), le gisement accessible à 30 €/kW est nul ou faible, dans une fourchette de 0 à 90 MW.

À 60 €/kW, il se situe dans une fourchette de 30 à 200 MW.

4.1.8. Textile et industries diverses

4.1.8.1. Présentation du secteur

Ce secteur comprend 2 NCE, le textile (NCE 34) et les industries diverses (NCE 38) qui sont essentiellement la transformation du bois (scierie et fabrication de panneaux de bois, charpentes, parquets...), mais aussi les imprimeries, le secteur du jouet.

À l'exception de la fabrication de panneaux de bois, c'est un secteur peu concentré. Sa consommation électrique est d'environ 7 TWh en 2013.

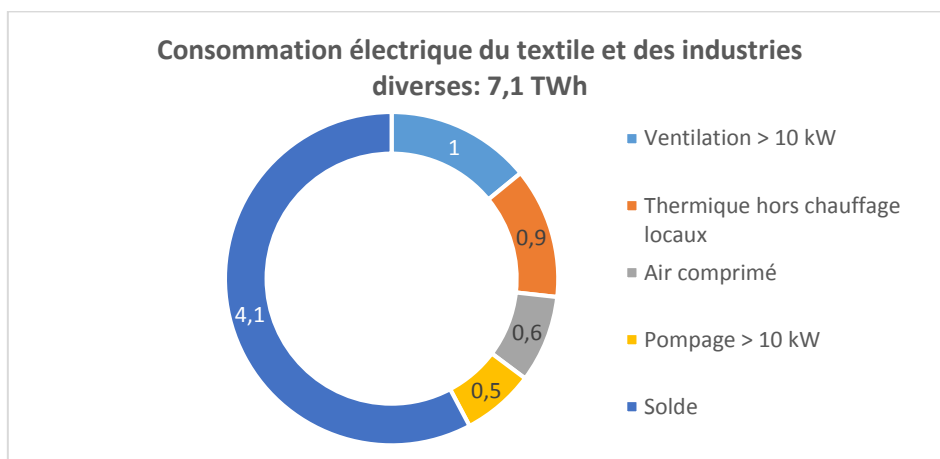


Figure 58 : Consommation électrique nationale "Industries diverses" (CEREN, 2013)

La consommation à usage thermique représente 13% de la consommation électrique, l'éclairage 6%, le chauffage des locaux 1%, le reste correspond à de la force motrice (80%).

Les besoins de la force motrice sont répartis de manière homogène, ils concernent les utilités (ventilation, production d'air comprimé, pompage...) et les usages process, notamment les broyeurs et les moteurs d'entraînement.

Le solde des usages électriques correspond aux moteurs de process, à la production de froid, à l'éclairage et au chauffage des locaux.

Cette répartition est le résultat statistique de profils différents et nombreux, filatures de textile, usines d'ennoblissement, usines de travail du cuir, scieries, constructeurs de charpentes en bois, fabricants de meubles, imprimeries....

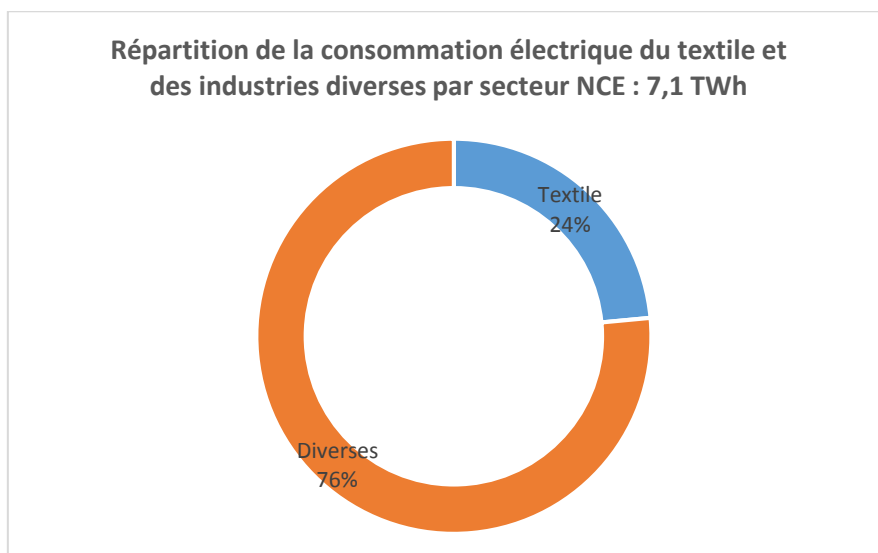


Figure 59 : Répartition par secteur NCE de la consommation électrique des industries diverses (CEREN 2013)

4.1.8.2. Variabilité de la consommation dans le temps

Les régimes de fonctionnement des établissements sont très variés : du 3x8h sans arrêt le week-end jusqu'au 1x8h.

Même si la consommation est plus élevée pour les sites fonctionnant en 3 équipes, la puissance moyenne appelée se répartit en 4 parts similaires, entre les sites en continu, ceux en quasi continu (arrêt le week-end), ceux en 2x8h et ceux en 1x8h.

La durée de la puissance moyenne appelée est de 5200 h par an.

Il ne semble pas y avoir globalement de caractère saisonnier sur le profil des consommations électriques, exceptés au mois d'août avec une baisse de consommation d'environ 20 à 40% (plus forte dans le textile que dans les industries diverses), et un fléchissement de la consommation en décembre.

4.1.8.3. Les usages effaçables et les contraintes associées

Les opérations transverses ont été indiquées lors des entretiens comme effaçables : le froid process (climatisation d'atelier) et le froid confort, l'éclairage et un peu de chauffage des locaux.

Pour les opérations spécifiques :

- le broyage pour le secteur de la production des panneaux de bois (dans l'atelier de préparation de matières premières) figure comme un procédé effaçable. En effet, l'atelier de préparation de matières premières dispose le plus souvent d'un stockage de plaquettes permettant de couvrir jusqu'à une semaine de production.

La puissance des broyeurs est d'environ 20% de la puissance moyenne appelée. Par ailleurs, celle-ci est plate et non saisonnière, comme dans l'ensemble de l'industrie, des usages thermiques sont considérés comme effaçables. Ils sont assez variés : séchage ou traitements thermiques.

4.1.8.4. Les caractéristiques de l'effacement

Les sollicitations d'effacement acceptables sont la veille pour le lendemain.

Le délai possible d'activation renseigné est d'une demi-heure.

Les niveaux de stock de produits intermédiaires étant important (voir le précédent paragraphe), la durée maximale d'effacement pourrait aller jusqu'à une journée.

La répétitivité n'est pas jugée possible, à moins d'une durée minimale de 12 h entre deux effacements et une durée d'effacement courte.

L'investissement dans des équipements d'asservissement, ou de pilotage/contrôle des équipements n'est pas jugé obligatoire, l'effacement pouvant être géré manuellement.

4.1.8.5. Le gisement technique d'effacement de process

La puissance moyenne appelée a été estimée à partir de la consommation annuelle en prenant en compte une durée de 5000 h par an.

La durée d'effacement potentielle est de 8 h pour les usages thermiques, tandis qu'elle n'est que de 2 h pour le broyage et pour le froid process.

Le scénario médian élaboré à partir de la part accessible moyenne de la puissance appelée conduit aux résultats suivants :

filière	puissance appelée moyenne accessible (GW)	part accessible	puissance effaçable 1/2 h (GW)	puissance effaçable 2 h (GW)	puissance effaçable 8 h (GW)
thermique	0,18	60%	0,11	0,11	0,11
froid	0,06	80%	0,05	0,03	0,00
broyage	0,06	80%	0,05	0,05	0,01
chauffage locaux	0,02	50%	0,01	0,00	0,00
éclairage	0,08	25%	0,02	0,02	0,02
TOTAL			0,24	0,21	0,14

Figure 60 : Ratios de puissances effaçables

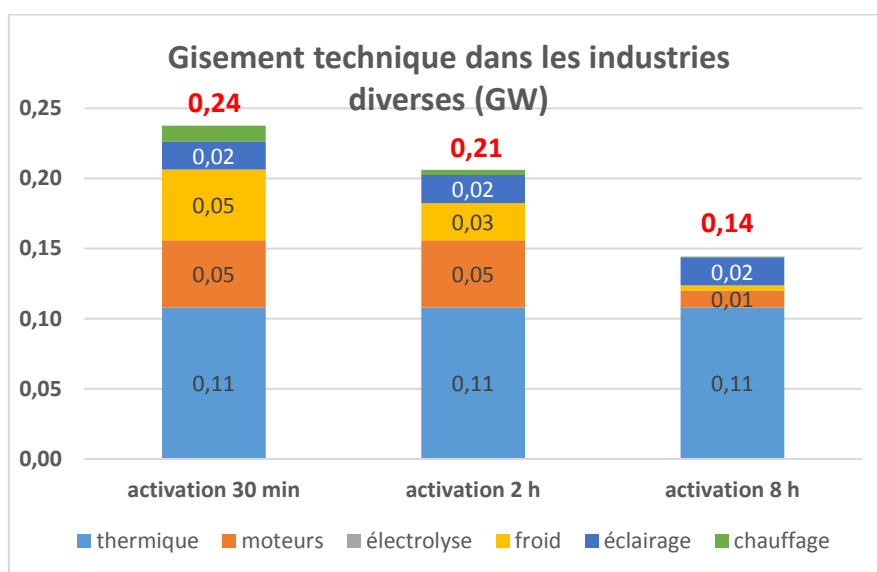


Figure 61 : Estimation du gisement technique dans les industries diverses en fonction de la durée d'effacement

Le gisement potentiel d'effacement diminue sensiblement entre 2 h et 8 h, du fait des usages broyage et froid qui nécessitent un foisonnement au-delà de 2 h.

Les parts accessibles des usages effaçables ont fait l'objet d'une estimation basse et d'une estimation haute, ce qui conduit à :

- un gisement technique d'effacement à 30 minutes entre 190 et 280 MW (valeur médiane à 240 MW)
- un gisement technique d'effacement à 2 heures entre 170 et 240 MW (valeur médiane à 210 MW)
- un gisement technique d'effacement à 8 heures entre 120 et 160 MW (valeur médiane à 140 MW)

4.1.8.6. Le gisement technico-économique d'effacement de process

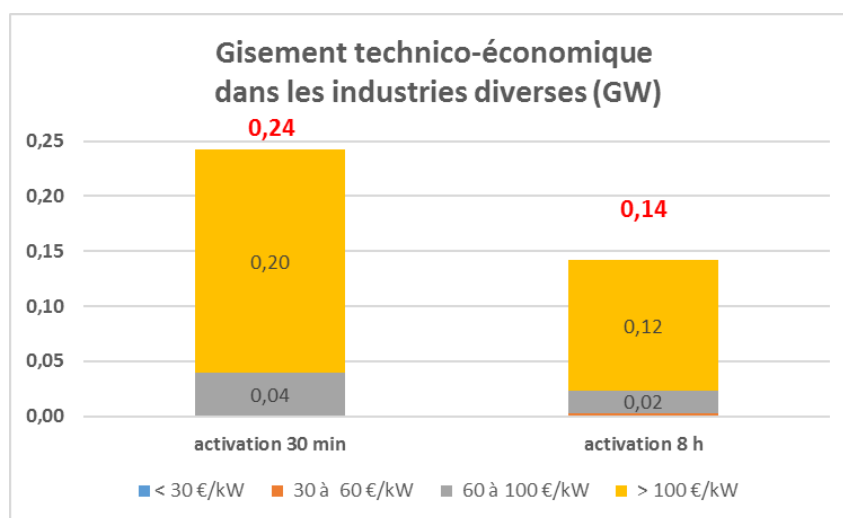


Figure 62 : Gisement technico-économique dans les industries diverses

Le gisement d'effacement est très peu accessible, il est atteignable au-delà d'une rémunération de 60 €/kW, et à plus de 80% au-delà d'une rémunération de 100 €/kW.

En prenant en compte un scénario bas qui allie des hypothèses basses pour le gisement technique et pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique est porté à 300 k€) et un scénario haut alliant des hypothèses hautes, notamment pour le gisement économique (le plafond de la facture électrique diminue de 200 à 100 k€), le gisement accessible à 30 €/kW est nul ou insignifiant, dans une fourchette de 0 à 12 MW.

À 60 €/kW, il se situe dans une fourchette de 0 à 50 MW.

4.1.9. Le secteur du grand commerce alimentaire

4.1.9.1. Les consommations électriques dans le grand commerce alimentaire

4.1.9.1.1. Les usages et les équipements

La consommation électrique des magasins du grand commerce alimentaire est caractérisée par 4 usages principaux de consommation : la consommation liée à la production de froid, pouvant être décomposée en froid « négatif » et froid « positif » (concernant respectivement la conservation des produits à une température négative (< 0°C) et positive (> 0°C), l'éclairage des magasins et la consommation liée à la climatisation, à la ventilation et au chauffage des magasins (lorsque celui-ci est électrique – via une pompe à chaleur) (« CVC »). Le reste de la consommation est constitué principalement par la consommation des fours de cuisson mais comprend aussi toutes les consommations liées à la bureautique et l'électronique²⁹, l'éclairage extérieur et éventuellement les stations-service.

- **Froid « positif » et froid « négatif » :**

La production de froid est réalisée par une série de compresseurs qui permettent la circulation d'un fluide frigorigène au sein des meubles de froid, des chambres froides de stockage et des « laboratoires » (pour les préparations). Cette production de froid peut être localisée sur les meubles mais est aujourd'hui le plus souvent centralisée au sein du magasin. Les groupes utilisés pour le froid négatif sont

²⁹ Consommation des outils utilisés pour la caisse, photocopieurs, photomaton, étiqueteuses, onduleurs, ...

le plus souvent distincts des groupes utilisés pour le froid positif. Ces groupes de production de froid fonctionnent à une puissance contrôlée permettant de maintenir la température des meubles et des chambres froides dans une plage de température de consigne. Ces plages de température de consigne dépendent des produits conservés. Pour le froid « positif », la consigne varie ainsi généralement entre $\sim 2^{\circ}\text{C}$ et $\sim 7^{\circ}\text{C}$. Pour le froid « négatif », la consigne dépend aussi des produits mais peut couramment descendre à environ -20°C .

Au-delà de la production de froid, les meubles froids représentent aussi une consommation liée notamment aux systèmes de cordons chauffants « anti-buée » ainsi qu'à l'éclairage interne des meubles.

- **Eclairage des magasins :**

L'éclairage des magasins comprend d'une part l'éclairage des allées, l'éclairage des pièces annexes (bureaux, réserves, ...) et l'éclairage interne des meubles (cf paragraphe précédent), le plus souvent assuré par des tubes fluorescents. La majorité des hypermarchés ont déjà en place un système centralisé (Gestion technique Centralisée (GTC)) de gestion de l'éclairage qui permet d'une part d'introduire des ordres prédéfinis d'extinction et d'allumage de l'éclairage mais aussi de contrôler les rampes d'éclairage par groupes (les rampes d'éclairage d'un magasin sont typiquement divisées en 3 à 4 groupes) ce qui permet de n'allumer l'éclairage que partiellement lors des horaires de remplissage des meubles avant ouverture aux clients.

- **CVC (Chauffage Ventilation et Climatisation):**

Lorsque le chauffage des magasins n'est pas réalisé par une chaudière gaz, celui-ci est réalisé le plus souvent par plusieurs pompes à chaleur (réversible et pouvant aussi assurer la climatisation) situées sur les toits des hypermarchés. A l'image du froid et comme pour la majorité des équipements de consommations de chauffage et climatisation des bâtiments tertiaires, ces équipements sont contrôlés par un système de gestion centralisé (GTC CVC) qui fixe des températures de consigne contrôlant le fonctionnement des équipements de chauffage/climatisation. La ventilation est, elle, contrôlée séparément avec possibilité, dans certains cas, de moduler le niveau de puissance de cette ventilation.

4.1.9.1.2. La répartition des consommations par usage

La répartition des consommations par usage est évidemment variable selon les magasins considérés, et varie notamment en fonction de l'énergie de chauffage (gaz ou électrique – le plus souvent gaz aujourd'hui), la localisation géographique des magasins (impactant la consommation de chauffage et climatisation) mais aussi des efforts d'efficacité énergétique engagés.

En ordre de grandeur, la consommation électrique annuelle moyenne pour un hypermarché (grande surface alimentaire $> 2500 \text{ m}^2$) se chauffant à l'électricité est d'environ 5000 MWh/an. **La production de froid constitue le plus gros poste de consommation électrique et représente $\sim 41\%$ de la consommation totale.** L'éclairage (hors éclairage extérieur) constitue le second poste avec $\sim 25\%$ des consommations. Le poste CVC (chauffage, ventilation, climatisation) représente quant à lui (lorsque le chauffage est électrique) environ 25% de la consommation. Les autres usages (fours de cuisson, bureautique et l'électronique, l'éclairage extérieur, stations-service, ...) représentent environ 10% de la consommation (voir Figure 63).

Consommation électrique d'un hypermarché chauffé à l'électricité
Source : ADEME/PERIFEM 2010

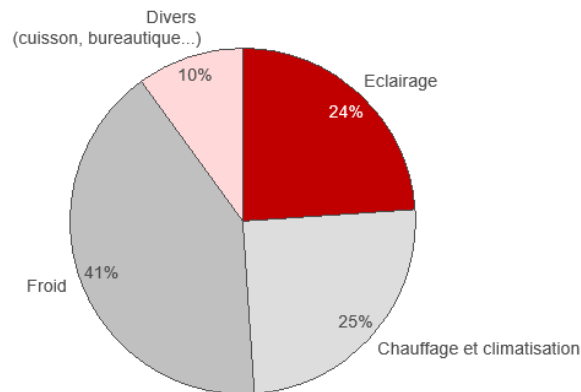


Figure 63 : Consommation électrique d'un hypermarché chauffé à l'électricité

4.1.9.1.3. La variation de la consommation : variation journalière et saisonnalité

La consommation des magasins varie aussi fortement de manière journalière (heures d'ouverture vs. heures de fermeture), hebdomadaire (jours d'ouverture et jours de fermetures) et saisonnière (été/mi-saisons/hiver), cette dernière variation ayant principalement un impact sur les postes chauffage, climatisation et froid.

Variation journalière et hebdomadaire

La graphique ci-dessous représente deux courbes de charges journalières typiques d'un hypermarché (courbes de charge au pas de temps 10 minutes), l'une pour un jour ouvré (en noir) et l'autre pour un jour non ouvré (en rouge). La courbe de charge représentant le jour ouvré démontre d'une part la forte variation journalière de la consommation électrique et d'autre part la forte variation au sein d'une même heure (le « bruit » de la courbe de charge). En effet, s'il existe un « talon » de consommation minimum même durant les heures de nuit (constitué principalement par la consommation de froid), la consommation d'un magasin connaît une forte montée en charge le matin au moment de l'ouverture du magasin (éclairage, mise en route de la ventilation, démarrage des fours de cuisson, ...). Par ailleurs, par rapport à la consommation d'un jour ouvré, la consommation d'un jour non ouvré est, elle, globalement plate et principalement constitué du « ruban » identique aux consommations nocturnes (froid principalement).

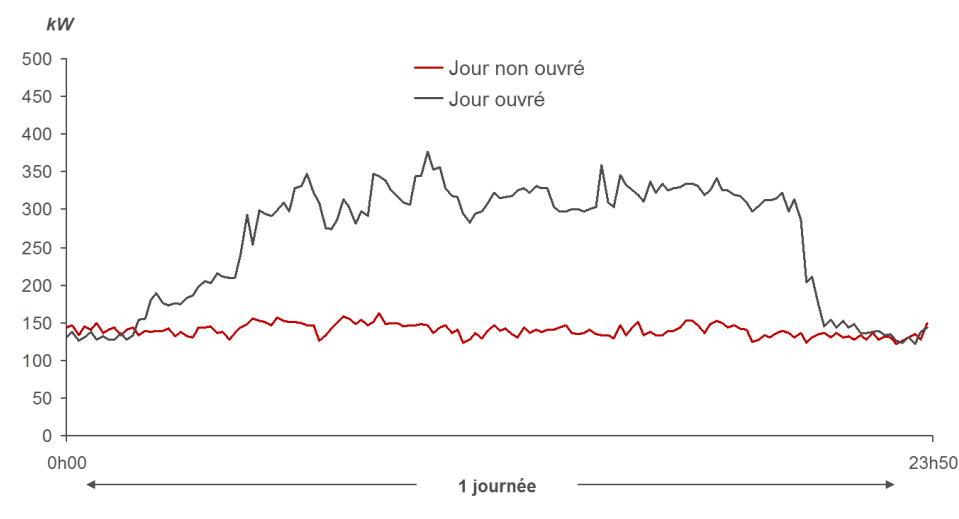


Figure 64 : Courbe de charge journalière d'un supermarché

Variation saisonnière

De la même manière, la consommation des différents usages varie fortement en fonction des saisons. La consommation liée à la production de froid peut être jusqu'à 1,5 fois supérieure en été qu'en hiver, celle du poste CVC étant elle faible deux fois plus faible en mi-saison qu'en hiver ou en été.

4.1.9.2. Les usages effaçables et les contraintes associées

D'un point de vue théorique, les postes de consommations effaçables sont les principaux postes de consommation des magasins, à savoir : le froid, l'éclairage et la CVC. En effet, l'effacement des autres usages (fours de cuisson, bureautique et l'électronique, l'éclairage extérieur, stations-service, ...) n'est pas envisageable.

- **Eclairage du magasin** : l'effacement des consommations d'éclairage au sein d'un magasin touche directement à une problématique commerciale sensible liée au marketing et à l'expérience client. En effet, les grandes enseignes de distribution attachent pour la plupart une grande importance à la qualité de l'éclairage et la mise en valeur de leur produit via l'éclairage dans les magasins et les la modulation des meubles. Si l'arrêt total de l'éclairage d'un magasin n'est évidemment pas envisageable, l'effacement partiel de la consommation d'éclairage et néanmoins possible soit en coupant une partie des rampes d'éclairage (typiquement un luminaire sur 2 ou 3, en utilisant les « modes » utilisés lors du remplissage des magasins avant les horaires d'ouverture) ou alors en modulation de la puissance de consommation des éclairages, lorsque la technologie d'éclairage le permet (si des LED sont mises en place par exemple). L'effacement de l'éclairage dans le grand commerce alimentaire est déjà réalisé par certaines enseignes aux USA (Wal-Mart, Safeway, Supervalu), cependant, aujourd'hui on ne recense pas d'exemple d'effacements en France ni au Royaume-Uni – cf encadré « benchmark » en page suivante.

- **La climatisation et le chauffage** : l'effacement des consommations liées au chauffage et à la climatisation dans les magasins répond à la même problématique que pour les bureaux et plus généralement les bâtiments tertiaires. Compte tenu de l'inertie thermique des bâtiments³⁰, il est possible de réaliser des effacements sur les usages climatisation et chauffage sur des durées limitées, de l'ordre de 1h à 2h, sans dégrader fortement le confort pour les clients. L'effacement de consommation est réalisé via une modification de la température de consigne de quelques degrés plutôt qu'un arrêt des équipements. L'arrêt de la ventilation, si elle n'a pas d'impact sur le niveau de température, est néanmoins plus impactant pour le confort des clients et donc plus complexe. A la maille globale du secteur du grand commerce alimentaire, le gisement d'effacement va néanmoins résider principalement sur l'usage climatisation (soit sur des périodes estivales nécessitant aujourd'hui moins d'effacements), le chauffage étant le plus souvent réalisé via une chaudière gaz (plutôt qu'une pompe à chaleur).
- **Le froid positif et négatif** : à l'image de la climatisation ou du chauffage, l'effacement des consommations liées à la production de froid peut être réalisée via une modification de la température de consigne de production de froid de quelques degrés plutôt qu'un arrêt des équipements. Les contraintes portent ici évidemment sur les contraintes sanitaires à respecter en termes de températures de conservation des produits. Sans stratégie de « stockage amont » dans les produits (c'est-à-dire de diminution volontaire de la température pour refroidir les produits en anticipation de la période d'effacement), les marges de manœuvre sont limitées, en particulier sur les produits conservés en froid positif pour lesquelles la plage de température acceptable est étroite avec à la fois un plafond et un plancher de température (pour éviter la congélation et la dégradation du produit et empêchant donc une stratégie de « stockage amont »). L'ordre de grandeur des durées d'effacement envisageables (hors stockage amont) est d'environ quelques minutes à ~30 minutes pour le froid positif et de 30 min à 1h pour le froid négatif (sans « stockage amont ») et 1h à 2h s'il y a eu mise en place d'une stratégie de « stockage amont ». D'un point de vue théorique, l'effacement est rendu possible par l'inertie des produits conservés et l'isolation permise par les meubles froids (et les chambres froides) mais cette dernière peut être largement dégradée en fonction des périodes de la journée et de l'affluence en magasin ainsi qu'en fonction des types de meubles mis en place (meubles avec ou sans porte pour le froid positif en particulier).
Au-delà de la production de froid et de façon plus marginale, un autre usage effaçable lié aux meubles froids et utilisé pour réaliser des effacements par certaines firmes américaines est l'arrêt de la consommation des cordons chauffants « anti-buée » des meubles à portes.

Les effacements développés dans le grand commerce alimentaire aux Etats-Unis

Plusieurs chaînes du secteur de la grande distribution alimentaire comme WAL-MART, SAFEWAY ou encore SUPERVALU valorisent aujourd'hui des capacités d'effacement de consommation aux Etats-Unis, via différents mécanismes de valorisation. Les principales leçons pouvant être tirées de la communication de ces acteurs ainsi que des opérateurs d'effacement travaillant pour ces enseignes sont les suivantes :

- Les postes de consommation les plus effacées en magasin sont l'éclairage, la climatisation et le désembuage des portes des meubles froids (« anti-sweat heaters »)
- L'effacement du froid alimentaire existe mais n'est pas répandu en magasin
 - WALMART n'efface pas le froid alimentaire
 - Les opérateurs CONSTELLATION et NET PEAK ENERGY indiquent que l'effacement du froid est rare chez leurs clients et réalisé uniquement pour des périodes de courte durée

³⁰ Les ordres de grandeurs communiqués par certaines entreprises interrogées sont une variation d'environ 1°C/heure

- L'opérateur ENERNOC indique que certains de ses clients effacent le froid et utilisent des stratégies cascado-cycliques et de sur-refroidissement (stockage de froid)
- L'effacement de froid est en revanche pratiqué pour les entrepôts frigorifiques
- Les groupes de « back-up » (groupes électrogènes de secours) sont très peu utilisés pour faire de l'effacement
 - La majorité des magasins ne sont pas équipés de groupes de « back up »
 - Les magasins qui en sont équipés les utilisent peu pour faire de l'effacement (ex : WALMART ne les utilise pas)
- Selon les interlocuteurs, la capacité mentionnée effaçable par magasin va de 5-10% à 30% de la consommation totale
- L'effacement de l'éclairage permet d'effacer environ 30 à 50% de la puissance d'éclairage et est réalisé via plusieurs méthodes :
 - Effacement de l'éclairage périphérique (hors de l'aire de vente (« *perimeter lighting* ») ; effacement d'une partie ciblée de l'éclairage comme l'éclairage spécifiquement décoratifs (ie non « nécessaire ») ; extinction d'un luminaire sur deux de manière homogène ; diminution de l'intensité de l'éclairage (si la technologie le permet (LED)).
 - Sur ce sujet, tous les acteurs affirment communiquer sur leur participation à des programmes d'effacement pour « compenser » le désagrément et retenir le client (préoccupations environnementales affichées pour justifier le désagrément potentiel lié à un effacement)
- Les grandes chaînes de distribution passent par des agrégateurs pour valoriser leurs effacements car la multiplicité des programmes (par état, au sein d'un même état) est très importante
- L'activation est toujours faite par un système de contrôle permettant l'automatisation des effacements
- La plupart des effacements réalisés sont des effacements de 30 min à ~4h liés à des programmes « emergency » avec des préavis courts (quelques heures)

4.1.9.3. Freins et barrières au développement de l'effacement dans le secteur

En France, si certaines grandes enseignes s'y intéressent ou s'y sont intéressées, l'effacement des usages dans le secteur de la grande distribution reste néanmoins aujourd'hui très peu développé. La grande majorité des effacements réalisés dans le secteur sont réalisés à partir de groupes électrogènes de secours, utilisés historiquement dans le cadre des tarifs EJP (Effacement Jour de Pointe).

Cette situation peut s'expliquer principalement par les freins et barrières suivants :

- **Un gisement fortement limité par des contraintes métiers importantes et touchant à des aspects sensibles pour l'activité commerciale**
 Comme expliqué et décrits aux paragraphes précédents, les capacités d'effacement des usages « effaçables » du secteur sont limitées par de nombreuses contraintes « métiers » :
 - la diminution de l'éclairage en magasin touche directement à une problématique commerciale sensible liée au marketing et à l'« expérience client », les acteurs de la grande distribution sont aujourd'hui peu enclins à permettre ce genre d'effacement ;
 - l'effacement des consommations de production de froid est limité par des contraintes sanitaires à respecter en termes de températures de conservation des produits, limitant les possibilités techniques à des modulations de faible durée et limitant donc le gisement d'effacement ;
 - il en est de même, dans une moindre mesure, pour l'effacement du poste CVC, impactant potentiellement le confort des client.

- **Des gisements unitaires faibles nécessitant une agrégation de nombreux sites de consommation**

La limitation du gisement par les contraintes « métiers » couplées à des puissances unitaires appelées relativement faibles (puissance moyenne totale de 300 à 500 kW pour un hypermarché, moins pour un supermarché) impliquent une capacité d'effacement par magasin faible. La valorisation des capacités d'effacement doit donc nécessairement passer par une agrégation d'un nombre important de sites de consommation, qui augmente donc la complexité de mise en œuvre (*cf point suivant*).

- **Une complexité forte à contrôler les consommations de manière centralisée et agrégée lié à :**

- **Une ancienneté et une hétérogénéité des équipements de consommation et de contrôle-commande (GTC, hypervisions) exploités dans les magasins, couplés à une opacité des protocoles de contrôle pour les acteurs externes comme les installateurs :** les GTC et les équipements de consommation exploités dans les différents magasins des enseignes de la grande distribution sont souvent très hétérogènes d'un magasin à l'autre, complexifiant l'harmonisation et la gestion centralisée des GTC ; par ailleurs, il existe, d'après les acteurs interrogés, une opacité des protocoles de contrôle/régulation, connus et maîtrisés par les installateurs mais non par les enseignes/magasins eux-mêmes.
- **Un écart encore important existant entre « capacités théoriques » des outils de contrôle des consommations des magasins et « capacités réelles/pratiques » de ces outils :** dans la pratique, l'installation des GTC dans les magasins est souvent incomplète (câblages non totalement réalisés, ...) et la mise en œuvre de capacités d'effacement dans ces magasins nécessite une revue complète de l'instrumentation, du câblage et de la fiabilité des protocoles de commande et du transfert d'information aux équipements consommateurs).
- **Des investissements nécessaires à la mise en place d'un système de contrôle centralisé des magasins lorsqu'il n'est pas déjà en place :** certaines grandes enseignes de distribution possèdent déjà un système de contrôle et d'hypervision permettant un contrôle centralisé des différentes GTC des magasins mais tous les magasins n'en sont pas équipés aujourd'hui ; la mise en œuvre d'effacement de consommation nécessiterait la mise en place de tels outils à une plus grande échelle, représentant donc des investissements non négligeables.
- **Un contrôle du réalisé des effacements complexe dû à des consommations très fluctuantes au sein d'une même journée :** (*cf paragraphe « La variation de la consommation : variation journalière et saisonnalité » sur le profil de charge*) l'identification et le contrôle du réalisé des effacements est complexe et peut tendre à sous-estimer les consommations réellement effacées.

- **Un niveau de rémunération actuel insuffisant par rapport aux contraintes à surmonter et aux risques associés**

Compte tenu des multiples freins et contraintes précédemment listés, la mise en œuvre de capacités d'effacement exploitables au sein du secteur du grand commerce alimentaire nécessite aujourd'hui de la part des acteurs de la grande distribution des investissements significatifs, tant sur le plan humain que sur le plan financier.

Par ailleurs, les risques associés à la mise en œuvre d'effacement, en particulier les risques sanitaires associés à la mise en œuvre d'effacement sur la production de froid, constituent une barrière supplémentaire à l'acceptation de la mise en œuvre d'effacement au sein des magasins.

In fine, le niveau de rémunération actuel accessible pour les capacités d'effacement en France est aujourd'hui jugé globalement insuffisant par les acteurs de la grande distribution pour compenser (i) les efforts à réaliser pour permettre leurs mises en œuvre et (ii) les risques associés impactant potentiellement directement leur cœur de métier.

A très court terme, le potentiel de développement de capacités d'effacement (sur les usages) dans le secteur du grand commerce alimentaire est donc faible. A plus long-terme, la mise en œuvre de capacités d'effacement pourrait être permise et simplifiée par la généralisation d'équipements communiquant plus performants, smart grid « ready », permettant une gestion du contrôle des équipements consommateurs de manière standardisée, automatisée et simplifiée par les acteurs de la grande distribution et les opérateurs d'effacement.

4.1.9.4. Estimation des gisements technique et technico-économique d'effacement (2016)

4.1.9.4.1. Estimation du gisement technique d'effacement de process

Le gisement technique est calculé sur la base des données et hypothèses suivantes :

- des données nationales de consommation électrique du secteur de ~9,6 TWh (Ceren 2013) et de la répartition des consommations électriques par usage
- d'une hypothèse de profil de consommation tel que présenté en partie 4.1.9.1.3
- de l'hypothèse que les usages susceptibles d'être effacés sont : les équipements de production de froid pour le stockage des produits, les équipements de climatisation et chauffage, les installations d'éclairage avec des durées spécifiques d'effacement pour ces différents effacements.

La durée maximale consécutive d'effacement est en effet variable en fonction des usages, et ces hypothèses de durée sont fondées sur les retours des entretiens réalisés dans le cadre de ce cas d'étude :

- Pour les usages froid (stockage froid), compte tenu des contraintes sanitaires, la durée maximale prise est de 30 minutes avec un report de consommation de 100% pendant la période suivant l'activation
- Pour les usages de climatisation et chauffage, compte tenu des contraintes de confort client, la durée maximale prise est de 1h avec un report de consommation de 100% pendant la période suivant l'activation
- Pour l'éclairage, il n'y a *a priori* pas de limitation de technique ou de contrainte sur la durée d'un effacement et pas d'effet report.

Pour s'effacer au-delà des durées maximales consécutives d'activation, il est nécessaire de réaliser un « foisonnement » entre différents sites (c'est-à-dire effacer l'un après l'autre des équipements ou des sites, de manière cascado-cyclique). Ces hypothèses de foisonnement ont un impact sur le gisement d'effacement et sont prises en compte dans cette étude (de même que la compensation d'un potentiel effet report) dans l'analyse des gisements d'effacement sur des plus longues durées d'activation.

Le gisement technique dans ce secteur est **estimé à ~500 MW pour des effacements courts (de moins de 30 minutes consécutives)**. Pour des durées d'effacement supérieures, il peut être estimé à : **~200MW pour 2h, ~100 MW pour 8h** (voir Figure 65).

4.1.9.4.2. Gisement technico-économique d'effacement de process

Le gisement technico-économique du secteur est calculé sur la base de l'estimation des coûts de développement des effacements (installation / mise à jour de GTB et coûts de gestion et informatiques) par site et à partir des estimations de gisements techniques précédents (voir 4.1.9.4.1)

La répartition des sites par taille est estimée par tranche de surface (de 400 à 2500m², de 2500 à 5000 m², de 5000 à 10 000 m², supérieure à 10 000 m²). Cette répartition permet d'estimer le coût de mise en œuvre des effacements (coût de la GTB liée à la taille du bâtiment) ainsi que la puissance effaçable par site et donc le besoin de rémunération pour couvrir ces coûts en € / kW_{effaçable}.

Les hypothèses de coûts de GTB et coûts opérationnels (fondées sur les entretiens) sont rappelées en Figure 65.

Pour des effacements de courte durée (30 min), le gisement d'effacement est estimé **comme non économiquement accessible pour des rémunérations actuelles (<30€/kW/an)**.
Pour des rémunérations entre 30 et 60€/kW/an, le gisement économiquement accessible est estimé à ~200MW et, pour des rémunérations entre ~60 et ~100€/kW/an, à ~300MW. Les gisements les plus accessibles vont être ceux liés aux plus grands hypermarchés présentant le meilleur ratio gisement unitaire / coût. La mise en place de capacité d'effacement dans les magasins de plus petite taille est plus coûteuse en €/kW_{effaçable}
Pour des effacements de plus longue durée (2h et 8h), les gisements sont estimés comme non économiquement accessibles (pour des rémunérations de l'effacement inférieures à 100€/kW_{eff}/an) (voir Figure 65).

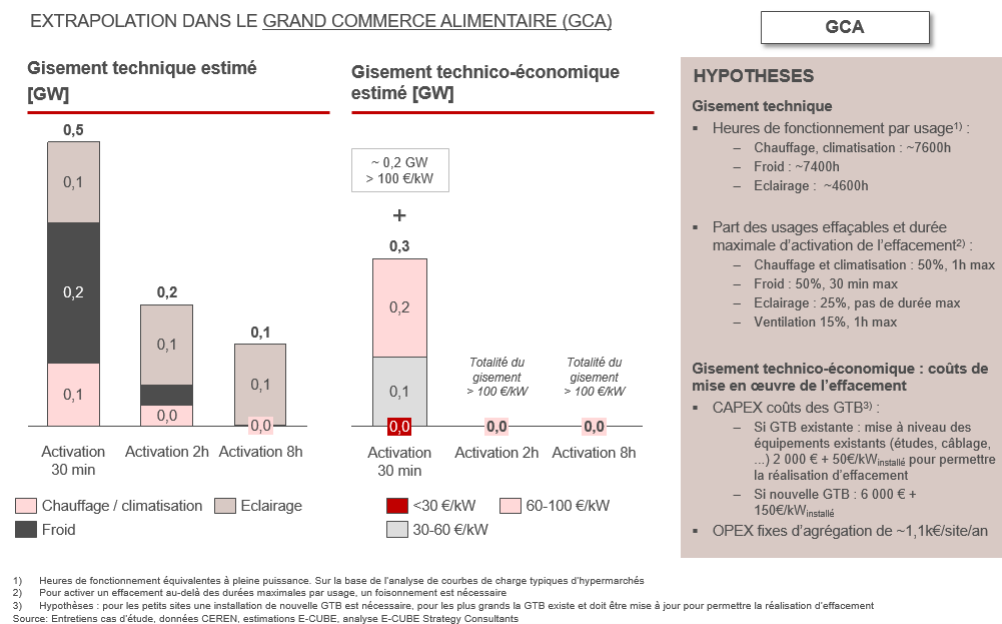


Figure 65 : Estimation de gisements d'effacement dans le grand commerce alimentaire

4.1.10. Les entrepôts frigorifiques

4.1.10.1. Les consommations électriques

4.1.10.1.1. Les usages et les équipements

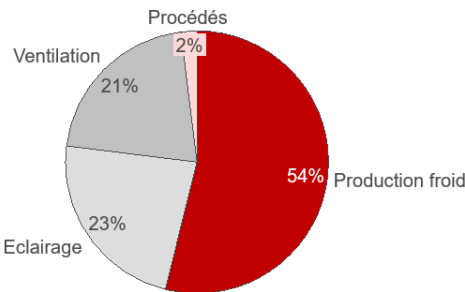


Figure 66 : Consommation moyenne des ateliers de stockage de froid positif (Source: ADEME) en énergie primaire

Les usages consommateurs d'électricité dans les entrepôts frigorifiques, qu'ils soient de froid positif ou négatif, sont semblables aux usages présents dans le grand commerce alimentaire. Les principaux usages sont en effet : la production de froid, l'éclairage et la ventilation. La répartition des consommations varie en fonction de la température de consigne des produits stockés : c'est la température du produit stocké qui détermine le niveau de température (le personnel travaillant dans l'entrepôt utilise des équipements de protection contre le froid). Par ailleurs, la quasi-totalité des usages consomme de l'électricité et la répartition de la consommation énergétique peut ainsi être assimilée à la répartition de la consommation électrique.

- **Production de froid** : pour un atelier de stockage de froid positif (température de consigne $>0^{\circ}\text{C}$), l'ADEME estime que la consommation de froid représente $\sim 54\%$ en moyenne pour un atelier de stockage de produits à 4°C ³¹. Cette part augmente avec la baisse de la température de consigne.
- **Ventilation** : La ventilation permet le brassage de l'air dans l'intégralité de l'entrepôt afin d'assurer la qualité de l'air et une température uniforme dans l'entrepôt.
- **Eclairage** : L'éclairage des entrepôts de froid inclut à la fois l'éclairage des zones de stockage de produits entreposés et l'éclairage des parties administratives de l'entrepôt (bureaux, zones de repos du personnel). L'éclairage moyen est d'environ 5 à 10W/m^2 (l'éclairage des surfaces de vente du grand commerce alimentaire pouvant aller jusqu'à $\sim 20\text{W/m}^2$).
- **Procédés** : Ce poste de consommation inclut notamment convoyage, transport par chariots, manutention et représente une faible part de la consommation électrique de l'entrepôt.

De même que pour le grand commerce alimentaire, les postes de consommation peuvent être pilotés de façon centralisée grâce à un système de GTB/GTC permettant de contrôler principalement la production de froid de l'entrepôt.

4.1.10.1.2. Variabilité saisonnière des consommations

Contrairement aux supermarchés et hypermarchés, la variabilité journalière et hebdomadaire est nettement moindre. En effet, bien que les opérations de manutention (chargement et déchargement) aient lieu principalement sur les heures ouvrées, les entrepôts de stockage frigorifique fonctionnent 24h/24 et 7j/7 et, la température de consigne de l'entrepôt étant celle des produits à stocker, la manipulation des produits a des effets plus limités sur la perte de froid que la manipulation des produits dans les armoires frigorifiques en magasin.

Cependant, la consommation de l'usage « production de froid » varie de façon significative en fonction des saisons, de même que dans les supermarchés et hypermarchés : la consommation d'électricité pour la production de froid est plus importante l'été que l'hiver.

³¹ Atelier de stockage froid positif « Ateliers industriels » - Août 2014, étude réalisée pour le compte de l'ADEME par ENEA Consulting et le CETIAT

4.1.10.2. Les usages « effaçables » et les contraintes associées

Dans le cas des entrepôts frigorifiques, l'usage effaçable principal est la production de froid, qu'il s'agisse d'un stockage de froid positif ou négatif.

Les contraintes d'activation sont en revanche différentes qu'il s'agisse d'un entrepôt de froid positif ou négatif :

- **Froid négatif** : L'effacement peut être réalisé grâce à une stimulation de la production de froid en amont de la période d'effacement (ce qui n'est pas le cas pour le froid positif, pour lequel l'inertie thermique est moindre), sans sur-refroidissement en amont, soit en mettant en place un équipement de stockage de froid. Les entrepôts de froid négatif peuvent admettre une flexibilité thermique de l'ordre de 8°C permettant de valoriser des effacements sans installation de stockage froid supplémentaire.

Pour un stockage à -30°C, la température est donc abaissée à approximativement -40°C et l'inertie thermique de l'entrepôt assure alors une température assez basse pour les produits stockés pendant la période de l'effacement. Ainsi, l'effacement est précédé d'une période de sur-refroidissement d'une durée équivalente à celle de l'effacement prévu : le délai minimum d'activation de l'effacement est donc égal à la durée de l'effacement envisagé. Par ailleurs, la durée d'un effacement ne peut excéder environ 2 à 3h en hiver et environ 1h en été, afin de répondre aux contraintes sanitaires de maintien des températures des produits stockés.

Des essais d'effacement ont été réalisés par divers acteurs du secteur ou opérateurs d'effacement. Energy Pool a notamment testé l'effacement sur deux entrepôts de froid négatif dans le cadre du projet EnR-Pool (projet mené de 2012 à 2014, soutenu par l'ADEME dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir et visant à effectuer des tests d'effacement dans divers secteurs industriels et tertiaires).

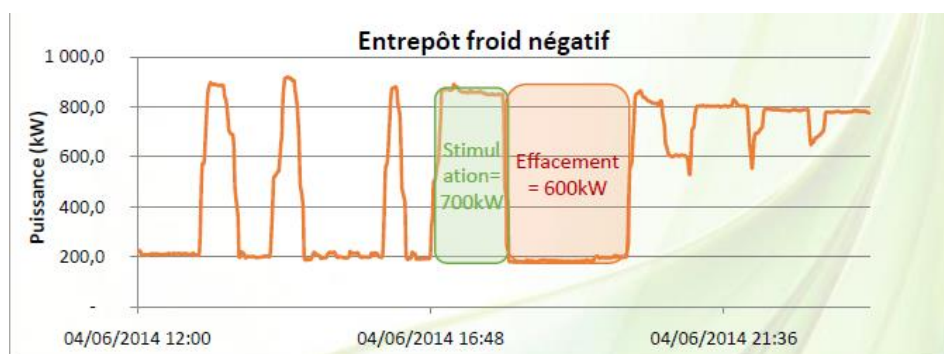


Figure 67 : Courbe de charge d'un entrepôt de stockage de froid négatif sur une période d'effacement (Source : ENR-Pool 2014)

- **Froid positif** : Concernant le froid positif, l'inertie thermique de l'entrepôt est moindre et moins adaptée pour faire un simple stockage par stimulation en amont de l'effacement. Les équipements participant à l'effacement doivent être équipés d'un système de stockage froid (ex : eau glacée) afin d'être flexibles. Ainsi, l'effacement est précédé d'une période de refroidissement intensifiée d'une durée équivalente à celle de l'effacement prévu au cours de laquelle le froid est stocké sous forme d'eau glacée : le délai minimum d'activation de l'effacement est donc égal à la durée de l'effacement envisagé.

Le projet EnR-Pool a également conduit les équipes d'Energy Pool à tester l'effacement sur un entrepôt de froid positif équipés d'un stockage d'air glacé pour un effacement d'une durée de ~60 minutes :

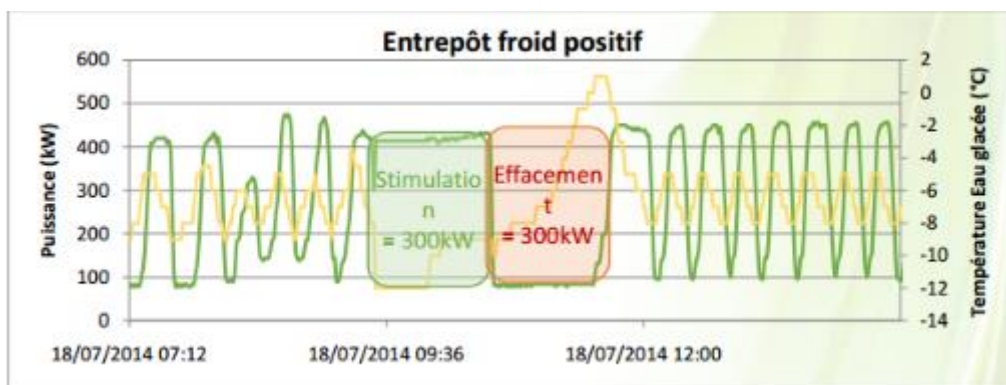


Figure 68 : Courbe de charge d'un entrepôt de froid positif sur une période d'effacement (Source : ENR-Pool 2014)

Valorisation d'effacement sur des entrepôts frigorifiques, en France et à l'étranger

- Aux Etats-Unis, EnerNOC, agrégateur d'effacement américain, opère des effacements de consommation sur des entrepôts frigorifiques. Avec Great Lakes Cold Storage, une société qui fournit deux centres de distribution avec des stockages réfrigérés (en froid positif et négatif), EnerNOC réalise des effacements à Solon, Ohio et Cranberry Township, Pennsylvanie. Les capacités effaçables sur chacun des sites sont de 700kW en Pennsylvanie et 900kW en Ohio.
- Au Royaume-Uni, Flexitricity valorise des effacements de consommation sur des process froid au sein d'entrepôts frigorifiques. Norish Cold Storage opère en effet 6 centres de distribution au Royaume-Uni incluant des entrepôts de stockage froid. La consommation électrique annuelle de l'ensemble des sites de Norish est de 21 GWh et Flexitricity pilote 0,9 MW d'équipements de stockage froid qui peuvent être modulés automatiquement à distance pour de courtes périodes. La valorisation de ces effacements est réalisée sur la Short Term Operating Reserve, réserve tertiaire organisée par National Grid ainsi que via le mécanisme implicite de valorisation visant à réduire les charges d'utilisation du réseau de transport (Triads).
- En France, Actility a signé un accord-cadre avec l'UNTF (Union Nationale du Transport Frigorifique) en 2013 dans le but de promouvoir le développement d'effacements auprès des acteurs de la logistique du froid.
- En France, Energy Pool a réalisé en 2014 des tests dans le cadre du projet ENR-Pool d'intégration des renouvelables dans le système électrique via la participation d'effacements.

4.1.10.3. Freins et barrières au développement des effacements dans les entrepôts de stockage froid

En France, les effacements de consommation sur des entrepôts frigorifiques sont actuellement développés uniquement sur des phases de test. Au-delà des barrières actuelles liées à la rémunération des effacements, les principales barrières au développement des effacements dans les entrepôts frigorifiques sont organisationnelles, de même que dans le grand commerce alimentaire :

- **Un gisement fortement limité par des contraintes métiers importantes et touchant à des aspects sensibles pour le cœur de métier (conservation de produits)**

En effet, les principales contraintes au développement des effacements dans les entrepôts frigorifiques (effacements de la production de froid), sont les mêmes que dans le grand commerce alimentaire : contraintes sanitaires de maintien des températures dans une plage définie. Le principal risque lié à un effacement sur de la

production de froid étant un défaut de l'équipement au moment du redémarrage, les opérateurs d'entrepôts frigorifiques sont réticents à arrêter la production de froid car une panne de redémarrage pourrait mettre en péril le stock de produits finis et générer des pertes significatives pour l'entrepôt et probablement largement supérieures à la rémunération accessible via la valorisation des capacités d'effacement.

- **Des gisements unitaires faibles nécessitant une agrégation de nombreux sites de consommation** de même que dans le grand commerce alimentaire. Les sites sont plus consommateurs en moyenne que les sites du grand commerce alimentaire, mais les gisements unitaires restent tout de même faibles par rapport à l'industrie.
- **Un niveau de rémunération actuel jugé insuffisant par rapport aux contraintes à surmonter et aux risques associés** de même que dans le grand commerce alimentaire

4.1.10.4. Estimation des gisements technique et technico-économique d'effacement (2016)

4.1.10.4.1. Estimation du gisement technique d'effacement de process

Le gisement technique est calculé sur la base des données et hypothèses suivantes :

- des données nationales de consommation électrique du secteur du ~1,1 TWh et de la répartition des consommations électriques par usage (CEREN 2013)
- d'une hypothèse de profil de consommation stable tous les jours hors dimanche (baisse de 50% de la puissance appelée le dimanche car les entrepôts sont moins utilisés)
- de l'hypothèse que seuls les équipements de production de froid pour le stockage des produits sont effaçables sur des durées consécutives d'effacement limitées pour cause de contraintes sanitaires à 30 minutes.

La durée maximale consécutive d'effacement pour les usages froid (stockage froid), compte tenu des contraintes sanitaires, est donc de 30 minutes avec un report de consommation de 100% pendant la période suivant l'activation. Pour s'effacer au-delà des durées maximales consécutives d'activation, il est nécessaire de réaliser un « foisonnement » entre différents sites (c'est-à-dire effacer l'un après l'autre des équipements ou des sites, de manière cascado-cyclique). Ces hypothèses de foisonnement ont un impact sur le gisement d'effacement et sont prises en compte dans cette étude (de même que la compensation d'un potentiel effet report) dans l'analyse des gisements d'effacement sur des plus longues durées d'activation.

Le gisement technique dans ce secteur est **estimé à ~60 MW pour des effacements courts (de moins de 30 minutes consécutives)**. Pour des **durées d'effacement supérieures (2h ou 8h)**, il peut être estimé à **moins de 20 MW** (voir Figure 69).

4.1.10.4.2. Gisement technico-économique d'effacement de process

Le gisement technico-économique du secteur est calculé sur la base de l'estimation des coûts de développement des effacements (installation / mise à jour de GTB et coûts de gestion et informatiques) par site et à partir des estimations de gisements techniques précédents (voir 4.1.10.4.1)

La répartition des sites par taille est estimée par tranche de surface (de 400 à 2500m², de 2500 à 5000 m², de 5000 à 10 000 m², supérieure à 10 000 m²). Cette répartition permet d'estimer le coût de mise en œuvre des effacements (coût de la GTB liée à la taille du bâtiment) ainsi que la puissance effaçable par site et donc le besoin de rémunération pour couvrir ces coûts en € / kW_{effaçable}.

Les hypothèses de coûts de GTB et coûts opérationnels (fondées sur les entretiens) sont rappelées en Figure 69.

Pour des effacements de plus longue durée (2h et 8h), les gisements sont estimés comme non économiquement accessibles (pour des rémunérations de l'effacement inférieures à 100€/kW_{eff}/an) (voir Figure 69).



4.1.11.1.1. Description des usages consommateurs d'électricité

Les usages spécifiques

- **Bureautique** : Le principal usage consommateur d'électricité est le poste informatique. Les équipements concernés consommateurs d'électricité sont principalement les ordinateurs, écrans, serveurs et appareils mobiles et connectés. Bien que les nouvelles technologies soient de plus en plus performantes, le nombre d'équipements croît rapidement notamment à cause du développement des appareils mobiles. Ces équipements fonctionnent principalement durant les heures ouvrées en semaine. Cependant, la consommation des équipements en veille et serveurs constituent une part de fonctionnement en « bande » 24h/24 et 7j/7. En règle générale, ces usages ne sont pas pilotés de façon centralisée.

- **Eclairage** : L'usage éclairage représente une part importante de la consommation électrique des bureaux puisque la majorité des surfaces sont équipées de systèmes d'éclairage, qu'il s'agisse des espaces communs ou des espaces de travail (bureaux à proprement parler). La généralisation des LED laisse penser que l'éclairage des bureaux va gagner en performance énergétique. L'éclairage est piloté, pour les grandes surfaces de bureaux par des centres de gestion centralisée. La majorité des grandes surfaces de bureaux ont en effet déjà en place un système centralisé (GTB Gestion technique du bâtiment) de gestion de l'éclairage qui permet d'introduire des ordres prédéfinis d'extinction et d'allumage de l'éclairage (heures d'ouverture et fermeture). Cet usage est particulièrement variable au cours de la journée (heures ouvrées vs. heures non ouvrées)
- **Ventilation et climatisation** : Lorsque les bâtiments sont climatisés, les équipements de climatisation sont souvent pilotés par un système de gestion centralisé (GTB Gestion technique du bâtiment) qui fixe des températures de consigne contrôlant le fonctionnement des équipements de climatisation mais également de chauffage. La ventilation est, elle, contrôlée séparément avec possibilité, dans certains cas, de moduler le niveau de puissance de cette ventilation.

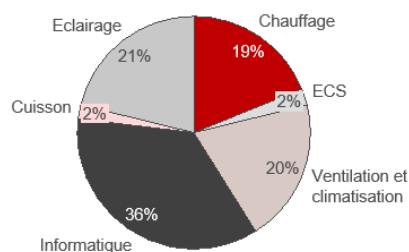
Le chauffage

Le chauffage, lorsqu'il est électrique dans les bâtiments tertiaires de bureaux, est réalisé grâce à des convecteurs ou des pompes à chaleur air-air (appareils réversibles qui permettent alors également de réaliser la climatisation). Cet usage est, comme précisé précédemment, dans la majorité des cas piloté de façon centralisée par un système de gestion centralisé (GTB Gestion technique du bâtiment).

4.1.11.1.2. La répartition des consommations par usage

Le principal poste de consommation électrique est l'informatique (qui inclut tous les équipements de bureautique) qui représente, en 2015, 36% de la consommation électrique totale du secteur soit 12,6 TWh. L'éclairage représente 21% soit ~7 TWh de consommation électrique au niveau national. Le chauffage représente une part de la consommation électrique plus faible car certaines surfaces de bureaux sont chauffées avec d'autres énergies (gaz principalement). Enfin, la consommation de la climatisation ventilation représente 20% de la consommation électrique du secteur des bureaux (~7TWh également) ; sachant qu'en 2012, 39% des bureaux étaient climatisés.

Consommation nationale d'électricité 2015 du secteur Bureaux
Total 2015: 35,1 TWh



Source: Bilan prévisionnel RTE 2016

Figure 70 : Consommation électrique du secteur des bureaux

4.1.11.2. Les usages effaçables et les contraintes associées

Les principaux usages qui peuvent être effacés dans le secteur du tertiaire de bureaux sont :

- La climatisation et le chauffage (CVC)
- L'éclairage

Des effacements peuvent en effet techniquement être mis en place sur ces deux usages.

- **La climatisation et le chauffage** : l'effacement de consommation sur ces usages repose sur l'inertie thermique des bâtiments qui rend possible un effacement sur une durée qui ne dégrade pas fortement le confort des clients/utilisateurs des locaux. Pour le chauffage, il est donc possible de réaliser des effacements sur le chauffage ou la climatisation sur des durées limitées, de 1 à 2h. Ces effacements sont réalisés en modifiant la température de consigne (à la baisse en hiver et à la hausse en été) grâce au pilotage des équipements par la GTB. Suite à l'activation de l'effacement, une période de rattrapage de la température de consigne « normale » a lieu et engendre un report de la consommation effacée.
- **L'éclairage** : l'effacement de consommation sur l'éclairage nécessite de piloter de façon centralisée les équipements d'éclairage afin de pouvoir moduler sur demande l'intensité lumineuse ou le nombre de rampes lumineuses allumées dans une pièce ou des espaces communs. La limitation de puissance effaçable est déterminée par la baisse de « confort » acceptée par les utilisateurs/occupants du bâtiment. En effet, la contrainte de dégradation du confort est le principal frein à la mise en place de ces effacements, une baisse de l'intensité lumineuse pouvant instantanément affecter le confort de travail des utilisateurs du bâtiment. Si des effacements sur l'éclairage sont mis en place, ils ne connaissent ni limitation technique de la durée d'activation ni report de consommation. En revanche, les durées d'activation peuvent être limitées par des contraintes extérieures comme par exemple la baisse de l'intensité lumineuse naturelle le soir.

Aujourd'hui en France, les tests réalisés sur les ensembles de bureaux d'effacements de consommation par modulation de process ne concernent que les usages thermiques (chauffage et climatisation), l'effacement d'éclairage n'étant pas une piste sur laquelle les opérateurs d'effacement cherchent actuellement à se positionner. En revanche, il existe des exemples de valorisation d'effacement sur les équipements d'éclairage dans le secteur des bureaux, aux Etats-Unis notamment.

Exemples de cas de valorisation d'effacements dans le tertiaire de bureaux à l'international

- Au Royaume-Uni, Kiwi Power valorise des effacements par modulation de process sur un immeuble de bureaux situé à Londres et occupé par un éditeur de contenus magazines (papier et digital) dans le cadre d'une démarche d'efficacité énergétique et verdissement de l'éditeur depuis 2009. Les effacements sont réalisés sur les systèmes de climatisation ainsi que les pompes à chaleur. Les tests ont conduit des effacements de l'ordre de 200kW délivrés en moins de 4 minutes.
- Sur le marché PJM aux Etats-Unis, une part non négligeable (9% en 2016) de la capacité valorisée sur le marché de capacité provient du tertiaire de bureaux avec des effacements principalement sur les usages CVC (climatisation, ventilation, chauffage) et éclairage.

4.1.11.3. Freins et barrières au développement des effacements

Le secteur tertiaire de bureaux valorise peu d'effacements de consommation par modulation de process, les freins au développement de capacités d'effacement étant actuellement trop forts.

- **Des gisements unitaires faibles nécessitant une agrégation de nombreux sites de consommation**

Tout d'abord, les gisements unitaires sont faibles par site et une valorisation d'effacements sur des mécanismes existants nécessite une agrégation de nombreux sites de consommation. Les puissances unitaires des usages effaçables sont relativement faibles impliquent en effet des gisements par site limités. De plus, l'agrégation

d'effacements sur un grand nombre de sites est plus complexe à mettre en œuvre que des effacements sur un site unique.

En effet, les enjeux de l'agrégation d'une multiplicité de sites tertiaires sont de piloter à distance, de façon centralisée et en temps réel des équipements de consommation sur différents sites.

- Les **équipements de contrôle commande (type GTB) sont souvent hétérogènes** en termes d'étendue des capacités de pilotage (nombre d'usages pilotables : climatisation, éclairages ...), d'âge de la GTB, d'optimisation des commandes, à distance et programmables uniquement par les installateurs de GTB.
- Les **équipements de mesure de consommations doivent par ailleurs être capables de mesurer des variations rapides de la consommation et de les communiquer au système central**. De tels équipements peuvent représenter un investissement pour la mise en œuvre d'effacements dans le tertiaire dans le cas où les systèmes de *metering*³² en place sont insuffisamment précis ou ne permettent pas de communiquer en temps réel avec les dispositifs de pilotage. Par exemple, au Royaume-Uni dans le cadre de la mise en place d'effacements dans un bâtiment de bureaux londonien, Kiwi Power a remplacé les systèmes de relève semi-horaires par un système *ad hoc* de relève minute par minute capable de communiquer avec le système de pilotage.

- **Une multiplicité des interlocuteurs qui rend complexe les prises de décisions**

La multiplicité des interlocuteurs et des parties prenantes côté client est une barrière à la mise en œuvre d'effacements. Cette multiplicité des interlocuteurs peut en effet rendre difficile l'acquisition de nouveaux clients pour les opérateurs d'effacement et donc le développement de nouvelles capacités, et ce particulièrement dans le secteur du tertiaire de « bureaux ». Les propriétaires des locaux, locataires et gestionnaires d'actifs sont souvent distincts et les parties prenantes supportant les coûts d'investissement dans les équipements sont souvent différentes de celles touchant les bénéfices de l'effacement, elles-mêmes différentes de celles pilotant la consommation énergétique du bâtiment ou subissant les contraintes liées à la mise en œuvre des effacements. Cette multiplicité des acteurs complexifie fortement la mise en place de capacités d'effacement pour un opérateur d'effacement.

- **Un niveau de rémunération actuel insuffisant par rapport aux contraintes à surmonter et aux risques associés**

Au regard de la faible rémunération actuelle des effacements, les acteurs du secteur tertiaire et plus particulièrement des bureaux ne font pas de la valorisation d'effacements une priorité. Aujourd'hui, les coûts d'investissements dans les équipements de contrôle/pilotage/mesure sont en effet élevés en comparaison avec les retours attendus, à plus forte raison sur des sites de bureaux présentant des gisements unitaires faibles.

Les consommateurs tertiaires bureaux développent plus d'actions dans le domaine de l'efficacité énergétique (pilotage intelligent des consommations électriques, mise à jour des GTB/GTC) avec pour objectif de réduire leur facture énergétique. La mise à jour des équipements dans ce cadre peut en revanche constituer une opportunité pour la valorisation des effacements si les équipements alors installés sont également « *smart grid ready* », c'est-à-dire que le coût marginal à investir par la suite pour pouvoir réaliser des effacements est faible.

³² Dispositif de mesure et/ou télérelève de la consommation d'un site

4.1.11.4. Estimation des gisements technique et technico-économique d'effacement (2016)

4.1.11.4.1. Estimation du gisement technique d'effacement de process

Le gisement technique est calculé sur la base des données et hypothèses suivantes :

- des données nationales de consommation électrique du secteur ~34,9 TWh et de la répartition des consommations électriques par usage (CEREN 2013)
- d'une hypothèse de profil de consommation variable en fonction des usages³³ (puissance appelée sur les heures non ouvrées de 77% par rapport à la puissance sur les heures ouvrées pour le chauffage et la climatisation – pour le maintien d'une température - et de 18% pour l'éclairage)
- de l'hypothèse que les usages susceptibles d'être effacés sont : les équipements de climatisation et chauffage et les installations d'éclairage avec des durées spécifiques d'effacement pour ces différents effacements.

La durée maximale consécutive d'effacement est en effet variable en fonction des usages, et ces hypothèses de durée sont fondées sur les retours des entretiens réalisés dans le cadre de ce cas d'étude :

- Pour les usages de climatisation et chauffage, compte tenu des contraintes de confort client, la durée maximale prise est de 1h avec un report de consommation de 100% pendant la période suivant l'activation
- Pour l'éclairage, il n'y a *a priori* pas de limitation de technique ou de contrainte sur la durée d'un effacement et pas d'effet report

Pour s'effacer au-delà des durées maximales consécutives d'activation, il est nécessaire de réaliser un « foisonnement » entre différents sites (c'est-à-dire effacer l'un après l'autre des équipements ou des sites, de manière cascado-cyclique). Ces hypothèses de foisonnement ont un impact sur le gisement d'effacement et sont prises en compte dans cette étude (de même que la compensation d'un potentiel effet report) dans l'analyse des gisements d'effacement sur des plus longues durées d'activation.

Le gisement technique dans ce secteur est **estimé à ~1,4 GW pour des effacements courts (de moins de 30 minutes consécutives)**. Pour des durées d'effacement supérieures, il peut être estimé à : **~0,8 GW pour 2h, ~0,5 GW pour 8h** (voir Figure 71).

4.1.11.4.2. Gisement technico-économique d'effacement de process

Le gisement technico-économique du secteur est calculé sur la base de l'estimation des coûts de développement des effacements (installation / mise à jour de GTB et coûts de gestion et informatiques) par site et à partir des estimations de gisements techniques précédents (voir 4.1.11.4.1)

La répartition des sites par taille est estimée par tranche de surface (de 400 à 2500m², de 2500 à 5000 m², de 5000 à 10 000 m², supérieure à 10 000 m²). Cette répartition permet d'estimer le coût de mise en œuvre des effacements (coût de la GTB liée à la taille du bâtiment) ainsi que la puissance effaçable par site et donc le besoin de rémunération pour couvrir ces coûts en €/kW_{effaçable}.

Les hypothèses de coûts de GTB et coûts opérationnels (fondées sur les entretiens) sont rappelées en Figure 71.

Pour des effacements de courte durée (30 min), le gisement d'effacement est estimé **comme non économiquement accessible pour des rémunérations actuelles (<30€/kW/an)**.

³³ Sur la base des observations des profils de consommation par usage pour les usages correspondants dans les supermarchés et hypermarchés (en comparant les ratios heures non ouvrées vs. heures ouvrées)



Pour des rémunérations entre ~30 et ~60€/kW/an, le gisement économiquement accessible est estimé à ~200MW et, pour des rémunérations entre ~60 et ~100€/kW/an, le gisement additionnel est estimé à ~100MW. Les gisements les plus accessibles vont être ceux liés aux plus grands hypermarchés présentant le meilleur ratio gisement unitaire / coût. La mise en place de capacité d'effacement dans les magasins de plus petite taille est plus coûteuse en €/kW_{effaçable}. Pour des effacements de plus longue durée (2h et 8h), les gisements sont estimés comme non économiquement accessibles (pour des rémunérations de l'effacement inférieures à 100€/kW_{eff}/an) (voir Figure 71).

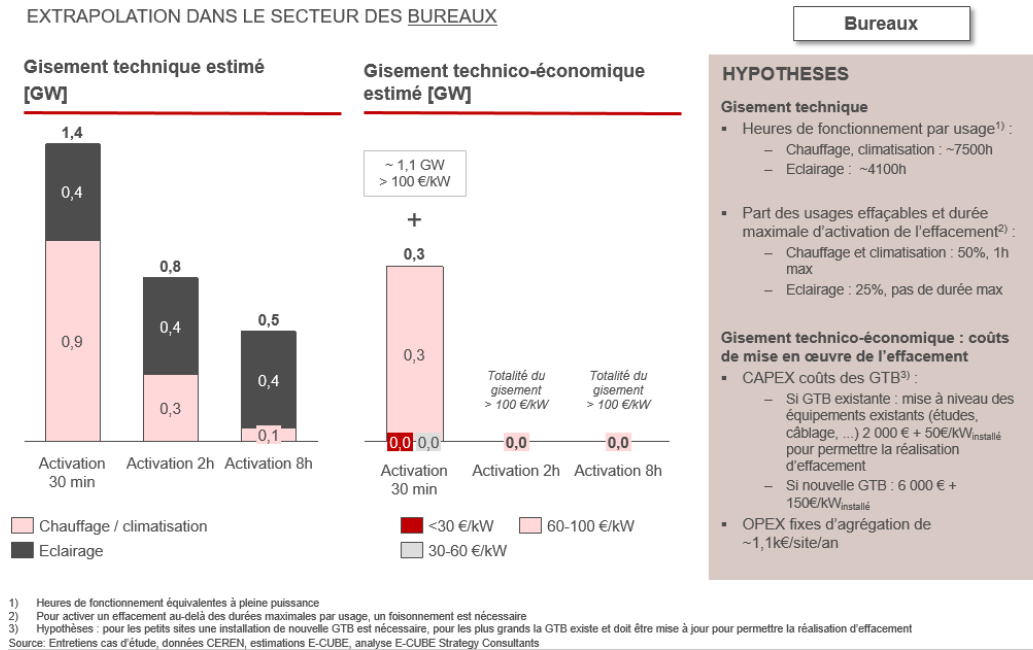


Figure 71 : Estimation des gisements techniques et technico-économiques pour le secteur des Bureaux

4.1.12. Le secteur du traitement et de la distribution de l'eau

4.1.12.1. Consommation énergétique des installations de traitement et distribution de l'eau

L'énergie représente un peu plus de 25 % des charges de production d'eau potable et environ 20 % des charges d'épuration des eaux usées³⁴. Ainsi, l'efficacité énergétique en général est un enjeu clé pour les exploitants de stations de pompage, production d'eau potable et stations d'épuration des eaux usées gérant des sites d'une puissance moyenne de l'ordre de quelques centaines de kW (~200-350 kW).

³⁴ Commission de Régulation de l'Energie

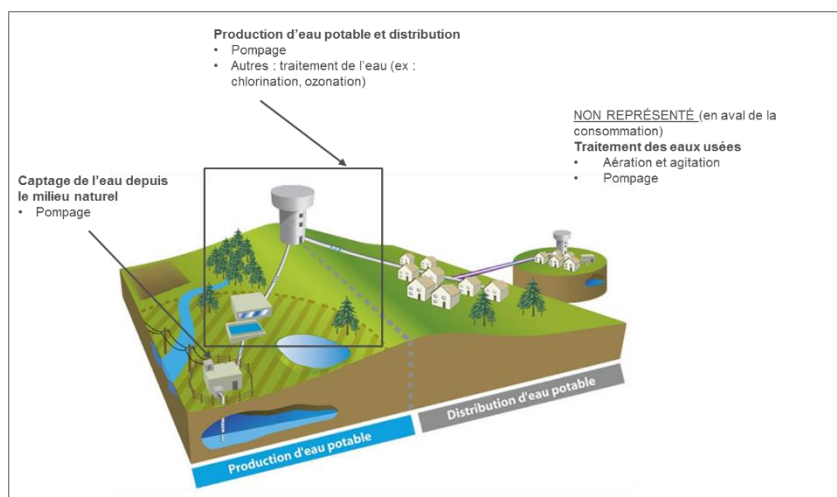


Figure 72 : Schéma descriptif des activités de traitement et distribution des eaux (incluant de gauche à droite : une station de pompage, une usine de production d'eau potable avec un stockage en amont de l'usine, un stockage en aval de l'usine avant la distribution, et un réseau de distribution d'eau potable) – Source : CRE

4.1.12.1.1. Installations de pompage et production d'eau potable

Les pompes en amont et en aval de l'usine de production d'eau potable sont une source importante de consommation énergétique dans la production (et distribution) de l'eau potable. En effet, en amont, l'eau est pompée dans trois types de réserves d'eau naturelle (eaux souterraines, eaux de surfaces, eaux de mer) et acheminée jusqu'à la centrale de traitement afin de transformer l'eau pompée en eau potable (filtration et traitements chimiques). La quantité de traitements à appliquer à l'eau dépend à la fois de la qualité de l'influent et des contraintes réglementaires sur la qualité des eaux potables distribuées. **En comparaison avec le traitement des eaux usées, la production d'eau potable est nettement moins consommatrice en énergie.** En effet, l'influent est en principe d'une qualité supérieure et les procédés de traitement moins lourds et leur consommation en énergie reste marginale par rapport aux pompes permettant l'approvisionnement de l'usine de production et la distribution aux consommateurs.

Les stations de pompage des eaux naturelles pour la production d'eau potable sont généralement distinctes des installations de production d'eau potable et leur consommation électrique est différente (voir Figure 72). En effet, sur les **stations de pompage 95% de la consommation électrique correspond à des usages de pompes**. Le **pompage** représente par la suite **70% de la consommation électrique des installations de production d'eau potable**, les 30% restants correspondant aux étapes de traitement de l'eau (filtration ou ultrafiltration, chloration, traitement au charbon actif ou ozonation) ainsi qu'aux usages spécifiques des bâtiments (éclairage, CVC dans les bureaux, matériel informatique).

4.1.12.1.2. Installations de traitement des eaux usées (station d'épuration)

Le traitement des eaux usées urbaines est réalisé dans les stations d'épuration, installations mettant en œuvre une succession de traitements physiques, chimiques et biologiques pour assurer aux rejets une qualité suffisante (critères de dosages physiques, chimiques et bactériologiques réglementaires) (voir Figure 73).

La première phase principale de traitement inclue une filtration de l'eau afin d'éliminer les déchets et matières en suspension (dégrillage, déssablage, déshuilage, décantation). Cette phase, le traitement primaire, n'est pas la plus consommatrice d'électricité (6-7%) (voir Figure 74). La seconde phase principale, la plus consommatrice d'électricité est la phase de traitement chimique et biologique dans un « bassin d'activation », le traitement secondaire. Les matières organiques présentes dans l'eau sont « activées » par une oxygénation continue du bassin (par aération et agitation) qui assure un traitement grâce aux microorganismes (des bactéries épuratrices).

présents dans les boues résiduelles en suspension. La dernière phase consiste en la décantation des boues présentes afin de les éliminer de l'eau ainsi traitée.

Le principal usage consommateur d'électricité dans la chaîne de traitement des eaux usées est donc **l'aération** (turbines ou insufflateurs d'air pour l'aération et turbines pour le brassage dans le bassin d'aération) qui regroupe à la fois aération et brassage et a lieu dans le bassin d'activation dans lequel un volume d'eau doit séjourner entre 8 et 50 heures (en fonction de la qualité de l'eau usée qui entre dans la station de traitement et de la qualité requise pour l'effluent de sortie) sous constante aération. Cette phase d'**aération représente en effet ~55% de la consommation d'électricité des stations d'épuration** (voir Figure 74), significativement plus que les usages des pompes (~15% pour le pompage des eaux usées en entrée du processus de traitement ou au cours du traitement).

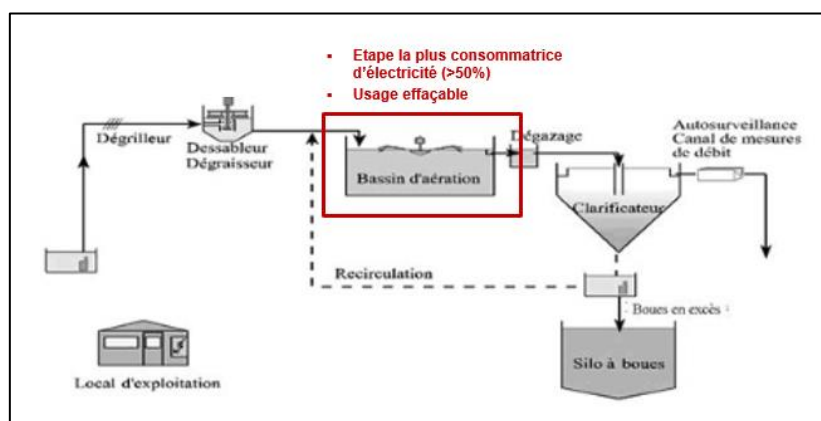


Figure 73 : Schéma de fonctionnement d'une station théorique

L'aération (et brassage) des bassins d'activation où a lieu le traitement secondaire (i.e. post filtrations) biologique n'est pas un process constant et l'afflux d'air est adapté à la charge bactériologique de l'eau à traiter (c'est-à-dire la quantité de microorganismes présents dans l'eau, la *Biological Oxygen Demand*, BOD). En effet, l'objectif est d'éviter une sous-aération ou sur-aération.

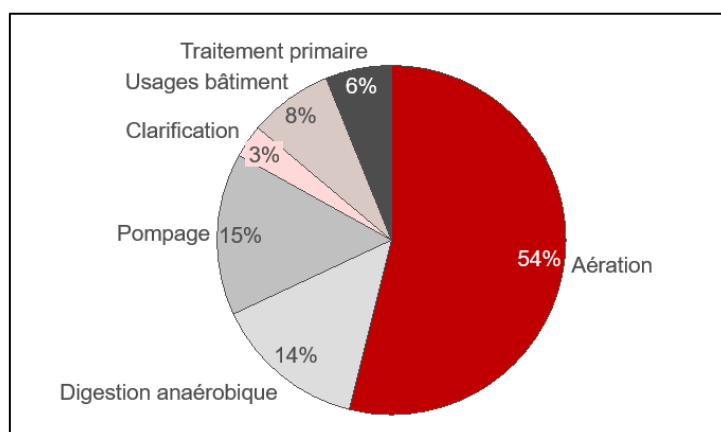


Figure 74: Répartition de la consommation énergétique d'une station d'épuration par usage [%]³⁵

³⁵ Source : Energy Resource Center de l'Université de Chicago, Illinois

4.1.12.1.3. Répartition de la consommation électrique des installations de traitement et distribution des eaux

Les installations de traitement et distribution des eaux incluent les stations d'épuration, les stations de pompage et les installations de production d'eau potable. Dans un portefeuille classique d'opérateur, la répartition des consommations électriques est la suivante :

- ~50% sur les stations d'épuration (avec ~15% sur les très grosses stations traitant les eaux de populations de plus de 200 000 habitants et 35% sur les stations de pompage de taille inférieure)
- ~25% sur la production d'eau potable
- ~25% sur les stations de pompage (des eaux naturelles en vue de production d'eau potable)

4.1.12.1.4. Variabilité des profils de consommation des installations de traitement et distribution des eaux³⁶

La demande électrique varie en fonction de la demande journalière en eau ou de l'afflux d'eaux usées, c'est-à-dire en fonction de l'activité humaine journalière. Ainsi, on observera une grande variabilité en fonction des agglomérations et des nombres d'habitants desservis par ces installations. Par ailleurs, la variabilité journalière est plus sensible sur les installations de petite taille.

Concernant les installations de production d'eau potable, sur un cas typique, on observe une variabilité journalière avec des demandes maximales entre 7h et 14h et entre 16h et 21h. La pointe maximale de demande en eau potable est environ 15% au dessus de la demande moyenne, qui entraîne par une hausse comparable sur la consommation énergétique. La variabilité hebdomadaire et saisonnière est fortement liée à la localisation de l'installation (agglomération urbaine, lieux touristiques, stations de ski, stations balnéaires...).

Concernant les stations d'épuration, la variabilité est infrajournalière et également quotidienne. En effet, on observe le plus souvent un creux important en pleine nuit (entre 2h et 6h du matin), puis deux pics distincts, un le matin (entre 7h et 9h) et un le soir (entre 18h et 21h). Ces variations suivent les variations de charge hydraulique et Biological Oxygen Demand (quantité de microorganismes dans l'eau).

Les fluctuations quotidiennes de la charge hydraulique sont attribuables en bonne partie aux précipitations et à la gestion des divers systèmes d'assainissement.

4.1.12.2. Les usages effaçables et les contraintes associées

La valorisation de la flexibilité des réseaux d'eau est possible car l'eau est plus facilement stockable que l'électricité. Il est donc possible d'avoir recours à la flexibilité des réseaux d'eau pour limiter les pics de consommation sur les réseaux de distribution d'électricité. Ceci passe par de l'ajustement (augmenter ou baisser la consommation d'électricité d'un site sur demande et avec une réactivité importante pour corriger les erreurs de prévision de la demande en électricité), l'effacement (décalage de consommation d'électricité pour éviter les pics de consommation³⁷) et le profilage (optimisation du profil de consommation en fonction des tarifs de l'électricité Heures pleines / Heures creuses ou EJP). L'eau peut en effet être stockée temporairement en divers points de sa chaîne de distribution dans le réservoir naturel duquel elle est pompée, dans les capacités de stockage intermédiaire de l'usine de production d'eau potable ou en amont de la distribution (ex : château

³⁶ Hydro-Québec et entretiens consommateurs au cours de l'étude

³⁷ On parle bien ici de décalage de consommation et non de renoncement car la consommation est toujours reportée après la période d'effacement (100% de report)

d'eau). Ces capacités de stockage sont inhérentes au processus de traitement et distribution de l'eau et hétérogènes en fonction des installations. Par ailleurs, les exploitants n'envisagent pas actuellement de modifier (augmenter) ces capacités de stockage pour des besoins du système électrique notamment pour des raisons organisationnelles et économiques.

Les usages effaçables dans le secteur du traitement et de la distribution d'eau sont les principaux postes de consommation sur les différents types d'installations c'est-à-dire le pompage et l'aération. En effet, le pompage est le principal usage effaçable sur les installations de production d'eau potable (parties pompage et traitement) et l'aération le principal usage effaçable au sein des stations d'épuration des eaux usées.

- **Pompage** : Les installations de pompage et de production d'eau potable ont pour premier objectif de délivrer une eau de qualité en fonction des besoins de la population desservie en tout instant. Pour cela, l'exploitant combine et programme le pompage depuis les réserves d'eau naturelles, la production d'eau potable en usine et le stockage (en amont ou en aval de l'usine de production d'eau potable). Ainsi l'effacement est plus facilement activable sur des sites plus « souples », à savoir intégrant de larges capacités de stockage, qu'il s'agisse de stockages positionnés après l'usine de production ou avant l'usine, de façon à rendre possible une inertie sur les sites (en vue de décaler la production d'eau potable ou le pompage depuis le milieu naturel, en fonction des heures creuses, heures de pointe). A l'inverse, bien que le pompage représente ~15% des dépenses énergétiques d'une station d'épuration, il est plus difficile de maîtriser les flux entrants et d'optimiser les consignes d'arrêt et de démarrage des équipements pour produire des effacements. Aussi, l'effacement des usages de pompes se fera principalement sur les installations de production d'eau potable (stations de pompage et stations de production d'eau potable).

La consommation électrique du pompage et donc la capacité d'effacement du pompage sur une installation donnée est dépendante de la demande en eau potable au moment de l'effacement ainsi que des capacités de stockage de l'installation. Cette demande est variable au cours de la journée et de la saison ce qui limite la capacité à garantir une puissance disponible en vue d'un effacement bien que cette demande soit prévisible à l'avance. Il n'y a en effet pas de puissance effaçable garantie pour chaque site à toute heure de la journée mais l'agrégation de capacités de pompage sur différents sites et traitées de façon statistique permet d'assurer une capacité d'effacement des pompes pour toute activation. **En effet, en fonction des heures de la journée les pompes sont activables de 5 minutes consécutives à 2 heures consécutives (en fonction de la charge du stockage d'eau, de la demande en temps réel),** mais en agrégé sur un portefeuille d'installations, la capacité disponible est relativement constante et permet d'activer un effacement à tout moment. **L'activation est réalisable en une dizaine de minutes** à partir de l'émission de l'ordre de la part de l'opérateur d'effacement qui a actuellement lieu de façon non automatisée (script d'ordre d'activation envoyé par l'opérateur d'effacement au client).

Par ailleurs, afin d'optimiser la consommation énergétique des installations sur les pompes, **certaines pompes sont équipées de variateurs électroniques de vitesse qui s'adaptent au besoin en temps réel de pompage.** Ainsi, il est possible d'envisager d'opérer des modifications de vitesse à la hausse ou à la baisse proche de la consigne opératoire afin de répondre rapidement à des besoins du réseau d'ajustement de la fréquence (réserve primaire). Cette activation pourrait se faire de façon rapide, avec un délai de l'ordre de la minute. Cependant, la complexité de mise en œuvre réside dans l'interaction entre ces consignes d'ajustement et les programmes de réglage des vitesses de pompes en fonction des niveaux de remplissage des stockages.

- **Aération** : L'aération dans les bassins de traitement biologique des eaux usées est le second usage principal qui peut être effacé sans mettre en péril la sécurité et la qualité des eaux épurées et ne concerne que le traitement des eaux usées. L'effacement peut se faire sur un arrêt court de l'aération ou une modification de la consigne de débit d'air. En fonction de la charge en microorganismes de l'eau à traiter dans le bassin d'activation, l'aération doit être adaptée afin que l'état du bassin ne se dégrade

pas : les risques de dégradation sont liés au comportement des microorganismes présents dans les boues traitées et traitantes qui peuvent flocculer (formation d'amas de bactéries et boues qui limitent la décantation), mousser ou se compacter et alors impacter la qualité de l'eau épurée rejetée après passage en station d'épuration. Ainsi, un effacement sur une aération ne peut pas être opéré à n'importe quel moment de la journée, et ces contraintes dépendent des indicateurs physiques (température, débit), chimiques (oxygénation, dosages d'azote), et biologiques (concentration en microorganismes). L'effacement sur l'aération requiert une validation de l'exploitant de la station d'épuration qui pilote ces différents indicateurs, ou un asservissement du contrôle de l'effacement à ces indicateurs. La capacité contractée et activable au niveau du portefeuille agrégé tient compte de ces possibilités non prévisibles en amont de refus d'activation pour cause de contraintes sanitaires de traitement de l'eau.

Les effacements développés dans la distribution et le traitement des eaux aux Etats-Unis, au Royaume-Uni et en France

Participation de compagnies distributrices d'eau aux programmes d'effacement de Pacific Gas & Electric (Californie, Etats-Unis)

- L'effacement en Californie a historiquement été initié sur les effacements dans le secteur de l'eau (*California Water Service*, société distributrice d'eau en Californie)
- Aujourd'hui, PG&E exploite les opportunités d'effacement dans le secteur de l'eau via des programmes d'effacements que la utilities, qui est à la fois transporteur, distributeur, et fournisseur, propose à ses clients eau via des tarifs incitant à la réduction des consommations d'électricité pendant les heures de pics.
- Sur un exemple de distributeur d'eau (distribuant l'eau à ~1000 points d'irrigation de terres agricoles) :
 - L'exploitant participant au programme de PG&E a effacé ~3MW de capacité sur 3 jours d'une année (réduisant leur demande de 8000 kWh) en effaçant les pompes, des aérateurs de l'épuration, des process de refroidissement ainsi qu'en évitant des opérations de maintenance des installations (backwash).
 - La rémunération de cet effacement par PG&E a totalisé 12 000 \$ (ajoutés à 11 000\$ économisés sur l'économie d'énergie réalisée)

Effacement d'usages de pompes et aérateurs pour le contrôle en fréquence par l'agrégateur Open Energi – Royaume-Uni

United Utilities, la plus grande société britannique de traitement et distribution d'eau (desservant 7 millions de personnes) a mis en place avec Open Energi, agrégateur d'effacement, sur ses sites de traitement du Nord-Ouest de l'Angleterre de l'effacement sur des courtes durées et avec des délais d'activation rapides de l'ordre de quelques secondes pour répondre à des besoins de National Grid de contrôler la fréquence sur le réseau en temps réel (mécanisme d'équilibrage : *Dynamic Frequency Response*)

Les usages effacés sont : l'aération des stations d'épuration (sur l'ensemble des technologies de traitement biologique), et pompes d'admission de l'eau et de sortie.

La mise en place est passée par l'installation sur les sites d'une « smart box » permettant aux équipements d'« échanger » avec le réseau et de répondre en quelques secondes aux variations de la fréquence du réseau.

En France, Veolia, en partenariat avec Actility, teste la flexibilité sur plusieurs usines de production d'eau potable en Vendée et en PACA. Des métropoles ont aussi décidé de s'engager dans cette démarche, comme c'est le cas pour la métropole de Lille à travers le projet So MEL So Connected financé dans le cadre du programme des Investissements d'Avenir par l'ADEME.

4.1.12.3. Freins et barrières au développement des effacements

Aujourd'hui les exploitants d'installations de traitement des eaux potables et usées sont des acteurs familiers des actions d'efficacité énergétique car opérant des process consommateurs d'électricité. Les principaux exploitants, ayant des portefeuilles d'installations importants valorisent eux des capacités d'effacement. Cependant, agrégateurs comme exploitants rencontrent des freins et barrières au développement de davantage de capacité d'effacement dans le secteur :

- **Des gisements unitaires limités nécessitant d'agréger les sites de traitement.** Les sites de traitement et distribution de l'eau présentent des puissances moyennes de quelques centaines de kW, et ont des potentiels d'effacement limités en termes de capacité par installation. Par ailleurs, les capacités d'effacement par site sont limitées par les contraintes métier : qualité de l'eau potable distribuée, qualité de l'eau épurée requise en fonction de la zone de rejet, capacités de stockage en amont et en aval des installations de production de l'eau potable, besoins en aération en fonction du type de traitement biologique au niveau de la station d'épuration, respect des cycles de traitement des eaux usées. Les installations de traitement et distribution de l'eau nécessitent donc l'agrégation de plusieurs sites pour atteindre une taille minimale suffisante pour la participation aux mécanismes explicites de valorisation des effacements. L'agrégation d'une centaine de sites permet par exemple d'assurer des effacements de quelques heures par jour (1 fois 1h ou 2h, 2 fois 1h ou 2h)
- **Aujourd'hui, la flexibilité des sites est déjà exploitée pour optimiser la facture électrique** (optimisation tarifaire) ce qui limite a fortiori la flexibilité qui peut être valorisée sur les différents mécanismes existants.
- **Une exploitation des capacités d'effacement complexe car les installations sont hétérogènes et la mise en place d'effacement nécessite l'adhésion des exploitants site par site.** La décision de mise en place d'effacement sur un site de traitement d'eau potable ou une station d'épuration se fait à la maille locale avec chacun des exploitants des installations, même si la décision a été prise au niveau de la maison mère. D'autre part, au-delà d'être hétérogènes en termes d'équipements, les traitements dépendent de la qualité de l'eau à traiter à un instant t, ce qui explique que la décision finale d'activation ou non d'un effacement doit revenir à l'exploitant. Enfin, pour ces raisons il est difficile de généraliser les pratiques pour un regroupement de sites.
- **Des méthodes de contrôle du réalisé qui limitent le potentiel exploitable à date.**
 - En effet, la preuve de la réalisation de l'activation est réalisée par RTE qui étudie les courbes de charges des installations activées, courbes de charge fournies par Enedis. Cependant, Enedis ne conserve les courbes de charge que pour les installations ayant une puissance souscrite supérieure à 250kW, ce qui laisse l'ensemble des installations de moins de 250 kW sans possibilité de traçage d'activation d'effacement. Les exploitants, souvent certifiés ISO 50 001, tiennent de leur côté un suivi de leurs courbes de charges grâce aux relevés de comptage Enedis pour l'ensemble de leurs installations y compris les installations de moins de 250kW mais ces courbes de charge reconstituées ne constituent pas une preuve de réalisation d'effacement pour RTE qui n'accepte pas d'autres courbes de charge que celles venant d'Enedis. Ceci a donc pour effet de limiter l'exploitation des effacements sur les installations de petites tailles.
 - Par ailleurs, les consommations sont fluctuantes au cours d'une journée et rendent l'identification et la preuve de l'activation plus compliqué.
- **La loi de programmation militaire (LPM) qui classe les installations de traitement des eaux comme des sites sensibles.** Un des principaux freins à l'exploitation de davantage de gisement d'effacement

dans le traitement et la distribution de l'eau repose sur la classification des installations de traitement des eaux comme des sites sensibles. En effet, la LPM interdit l'ouverture de ces sites à des mécanismes de contrôle externes quels qu'ils soient, l'exploitant étant le seul opérateur autorisé à contrôler et piloter les installations. Cela limite donc l'installation de dispositifs de pilotage des installations par les agrégateurs pour pouvoir procéder à des effacements. Les ordres d'activation doivent donc arriver de l'opérateur d'effacement à l'exploitant des installations pour un pilotage par l'exploitant. L'automatisation et l'asservissement des systèmes aux demandes de l'opérateur d'effacement sont aujourd'hui exclus.

- **Un niveau de rémunération actuel insuffisant par rapport aux contraintes à surmonter.** En effet, les niveaux de rémunération actuels sont jugés faibles au regard des contraintes d'activation qui perturbent l'organisation des exploitants sur site. De même, les incertitudes sur les niveaux de rémunération peuvent constituer un frein à l'investissement des consommateurs dans des dispositifs leur permettant de réaliser des effacements.

4.1.12.4. Estimation des gisements technique et technico-économique d'effacement (2016)

4.1.12.4.1. Estimation du gisement technique d'effacement de process

Le gisement technique est calculé sur la base des données et hypothèses suivantes :

- des données nationales de consommation électrique du secteur ~6,6 TWh et de la répartition des consommations électriques par usage présentées précédemment en prenant l'hypothèse que la consommation d'électricité est répartie à 60% sur le traitement des eaux usées et à 40% sur la production d'eau potable (Source CEREN)
- d'une hypothèse de profil de consommation constant présentant des pics de puissance entre 7 et 14h et entre 16h et 21h (soit ~8200 heures équivalentes de fonctionnement à puissance maximale)
- de l'hypothèse que les usages effaçables sont
 - Sur les sites de production d'eau potable : le pompage est un usage effaçable, ayant une durée maximale consécutive d'effacement de 2h, avec 100% de report sur la période suivant l'effacement
 - Sur les stations d'épuration : l'aération est un usage effaçable à 100%, ayant une durée maximale consécutive d'effacement de 2h, avec 100% de report sur la période suivant l'effacement

La durée maximale consécutive d'effacement pour ces deux usages est liée à la durée des effacements proposés par les acteurs du secteur. Pour s'effacer au-delà des durées maximales consécutives d'activation, il est nécessaire de réaliser un « foisonnement » entre différents sites (c'est-à-dire effacer l'un après l'autre des équipements ou des sites, de manière cascado-cyclique). Ces hypothèses de foisonnement ont un impact sur le gisement d'effacement et sont prises en compte dans cette étude (de même que la compensation d'un potentiel effet report) dans l'analyse des gisements d'effacement sur des plus longues durées d'activation.

Le gisement technique dans ce secteur est **estimé à ~500 MW pour des effacements de courte et moyenne durée (de moins de 2 heures consécutives)**. Pour des durées d'effacement supérieures, il peut être estimé à : **~75 MW pour 8h** (voir Figure 75).

4.1.12.4.2. Gisement technico-économique d'effacement de process

Le gisement technico-économique du secteur est calculé sur la base de l'estimation de l'attente de rémunération des exploitants de sites de traitement des eaux usées ou production d'eau potable et à partir des estimations de gisements techniques précédents (voir 4.1.12.4.1).

La répartition des sites par taille est estimée par tranches de « population desservie par le site » (équivalent humain), ces données étant fondées sur une répartition des stations d'épuration en France (2008, Source Ministère de l'Environnement, Energie et de la Mer). Cette répartition permet d'estimer l'attente de rémunération ainsi que la puissance effaçable par site et donc l'attente de rémunération par kW_{effaçable}.

Pour rappel, les hypothèses sur les attentes de rémunération par site sont prises comme suit :

Critère de mise en place	Sc. référence	Sc. bas	Sc. haut
Plancher minimal	20 k€/an	20 k€/an	20 k€/an
% attendu sur la facture électrique	5% ¹⁾	7%	3%
Plafond maximal	200 k€/an	300 k€/an	100 k€/an

1) Pour un site d'une consommation électrique ~10GWh/an, 5% de la facture électrique représente ~40 k€/an

Le gisement d'effacement est estimé comme non économiquement accessible actuellement sur les principaux marchés sur lesquels des effacements sont valorisés (ou pour des rémunérations de l'effacement inférieures à 100€/kW/an). **L'intégralité du gisement d'effacement de process dans le secteur du traitement et de la distribution des eaux est en effet situé au-delà de 100€/kW/an.** (voir Figure 75)

Aujourd'hui cependant, certains sites de taille importante valorisent des effacements de manière opportuniste, en utilisant des process déjà existants (ne nécessitant donc pas d'investissements supplémentaires type commandes d'arrêt pré-enregistrées sans équipements complémentaires) sur les appels d'offres effacement ou sur les marchés d'ajustement sans prendre d'engagements de disponibilité.

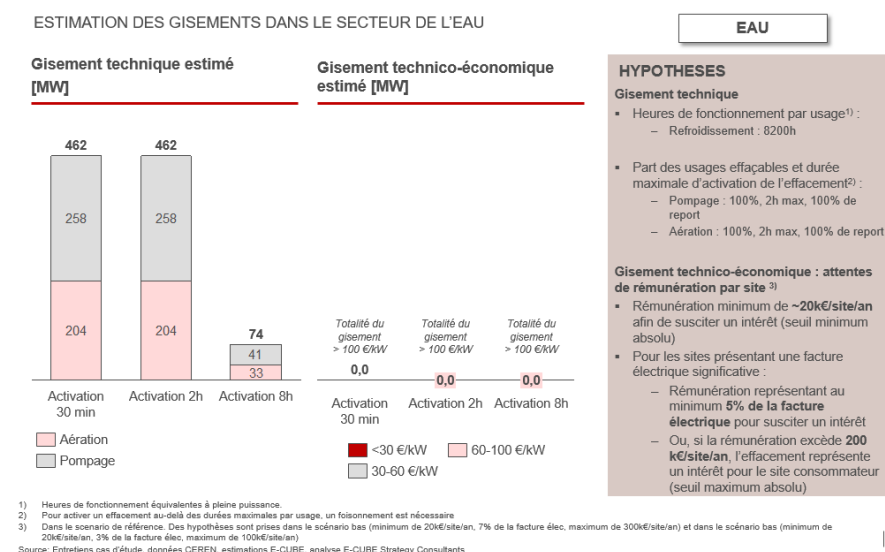


Figure 75 : Estimation des gisements technique et technico-économique dans le secteur du traitement et distribution de l'eau

4.1.13. Le secteur des Data Centers

4.1.13.1. Consommation énergétique des data centers

4.1.13.1.1. Description des usages consommateurs d'électricité

Les data centers sont des centres de traitement des données et sont concrètement des lieux physiques regroupant des serveurs informatiques qui stockent des données numériques. La consommation énergétique des data centers reflète de façon relativement fidèle la croissance de la « consommation digitale » de nos sociétés avec des besoins en capacités informatiques croissants, à savoir une croissance de ~25% par an du trafic informatique des data centers³⁸.

On distingue les salles de serveurs privées (data center corporate) des hébergeurs qui proposent aux entreprises de louer une partie du stockage disponible sur leurs serveurs. L'enjeu à développer des capacités d'effacement se concentre principalement sur les hébergeurs et les data centers corporate de taille significative. En effet, l'activité « centre de traitement des données », particulièrement consommatrice d'électricité, est le cœur de métier des hébergeurs alors qu'elle est une activité support de la « production » pour les entreprises utilisant des serveurs privés. La consommation nationale électrique des data centers représente entre ~3,5TWh (données CEREN) et ~5,8 TWh (Source : EDF, via entretiens).

Les serveurs ne sont jamais éteints et nécessitent une alimentation électrique continue et stable. Les entreprises « locataires » d'espace de stockage chez les hébergeurs ont en effet recours à ces serveurs pour chaque accès à des données qui y sont stockées. La priorité absolue des hébergeurs est donc d'assurer une qualité de service sans failles à leurs clients finaux soit une disponibilité à 100% des serveurs que les requêtes sur ces serveurs soient fréquentes ou non.

Les principaux usages consommateurs d'électricité dans les data center sont d'une part l'utilisation des serveurs informatiques (accompagnés de leurs « switchs ») et l'utilisation des équipements de refroidissement (production de froid, climatisation) permettant de contrebalancer l'importante quantité de chaleur produite par les équipements informatiques. En effet, la chaleur générée par le stockage des informations et la recherche de données génèrent une grande quantité de chaleur et des hausses importantes de la température du data center peuvent causer des défaillances graves voire irrémédiables : perte temporaire des informations (arrêt due à la surchauffe), perte partielle ou totale des informations (hub grillé).

Une étude Emerson Network Power modélise un data center de 500m² pour une puissance de 1,1MW répartie entre les différents usages :

- 52% de consommation des équipements informatiques
- 38% de consommation des équipements de refroidissement
- 10% d'éclairage, approvisionnement en électricité

³⁸ Source : Cisco Global Cloud Index 2016

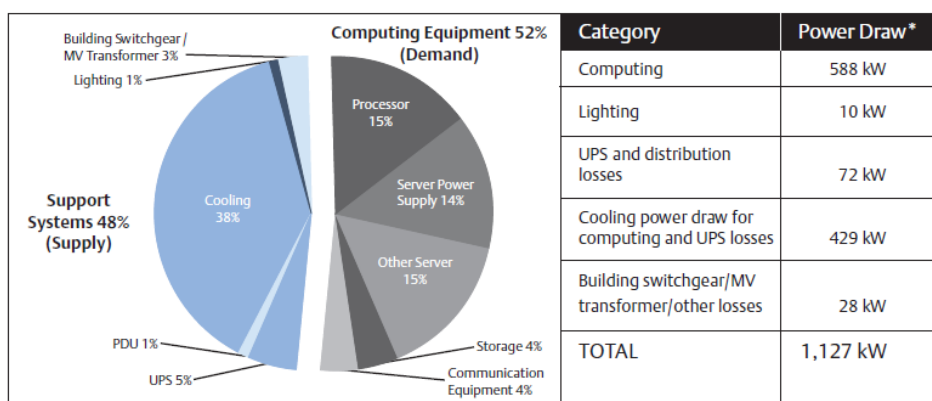


Figure 76: Modélisation de la consommation électrique d'un data center de 500m² (Emerson Network Power)

- Les équipements informatiques consommateurs d'électricité sont :
 - o les serveurs informatiques fonctionnant sur différentes plateformes comme Windows ou Linux,
 - o l'architecture réseau composée des routeurs et commutateurs (switches)
- Les data centers sont équipés de systèmes de batteries de secours (UPS, Uninterrupted Power Supply) et de générateurs diesel de secours afin d'assurer une alimentation électrique sans aucune interruption. L'alimentation électrique des data centers étant en effet indispensable à tout instant sous peine de risque de pertes de données et de dommages aux équipements, les installations sont toutes équipées de groupes de secours diesel permettant d'assurer un relai en cas de coupure électrique et d'onduleurs afin de pallier les micro-coupures sur le réseau de distribution / transport. Les groupes électrogènes sont testés régulièrement.

4.1.13.1.2. Efficacité énergétique des data centers

L'efficacité énergétique des data centers est un indicateur très suivi par les exploitants, la consommation électrique des data centers étant un poste de coûts important pour les hébergeurs opérant de grands data centers (environ 20 à 30% des coûts). L'indicateur PUE, *Power Usage Effectiveness*, mesure l'efficacité d'un data center en termes de climatisation, approvisionnement en électricité. Il est reconnu comme l'indicateur de référence pour la mesure de l'efficacité énergétique d'un data center par l'Union Européenne et est aujourd'hui l'indicateur le plus utilisé pour comparer les performances énergétiques des data centers entre eux. Le PUE est égal à la puissance totale consommée par la salle incluant la climatisation, l'éclairage et les serveurs divisée par puissance électrique consommée seulement par les serveurs.

$$PUE = \frac{\text{Energie totale consommée par le data center}}{\text{Energie totale consommée par les équipements informatiques}}$$

Plus le PUE est proche de 1, plus le data center est énergétiquement efficace. Les salles de serveurs privées ont en moyenne un PUE de 2, contre 1,3-1,4 en moyenne pour les data centers de grande taille (principalement des hébergeurs).

Il convient cependant de noter que le PUE ne tient pas compte de l'emplacement géographique du site (température extérieure), du taux de disponibilité et du taux de charge du data center (consommation électrique totale rapportée à la puissance électrique utile (hors secours)).³⁹

³⁹ Source : L'efficacité énergétique dans les data centers, EN'CERT, ATEE – Novembre 2016

4.1.13.1. Variabilité et saisonnalité de la consommation des data centers

Bien que les data centers fonctionnent jour et nuit 365 jours par an et ne soient jamais éteints, le fonctionnement des serveurs n'est pas constant. Ils ne fonctionnent que lorsque des données sont appelées, traitées, recherchées. Les variations du taux d'utilisation des serveurs sont en effet fortement corrélées aux heures ouvrées comme le montre la Figure 77. Cependant, le taux d'utilisation des serveurs ne reflète pas la consommation électrique du data center car un serveur non utilisé reste actif et sa consommation est égale à ~80% de la consommation électrique lors d'utilisations (Cf Figure 77).⁴⁰

Ainsi, la consommation électrique est très stable au cours de la journée, la variation journalière de puissance appelée étant très faible.

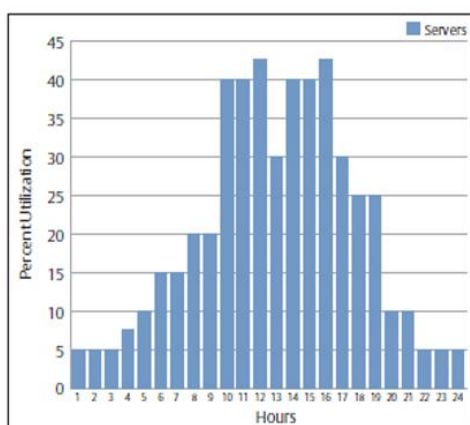


Figure 10. Daily utilization for a typical business data center.

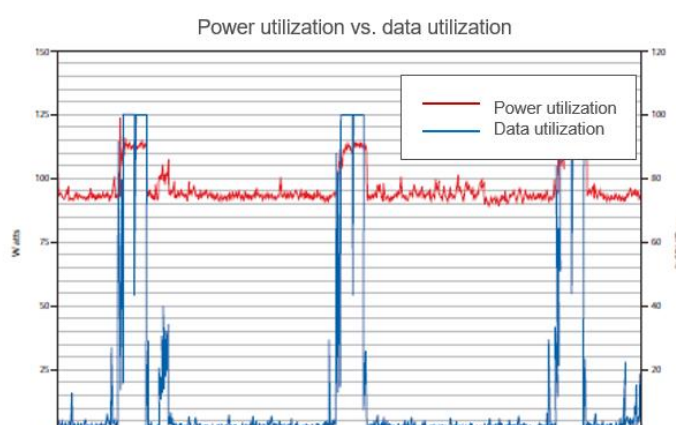


Figure 11. Low processor activity does not translate into low power consumption.

Figure 77 : Utilisation journalière d'un data center et puissance appelée (Source : Emerson Network Power)

La variabilité saisonnière de la consommation concerne les équipements de refroidissement qui sont davantage sollicités en période estivale. La variation de puissance totale appelée (froid + serveurs) dépend fortement de la localisation géographique et un des sites étudiés observe une variation de l'ordre de ~10-20% de sa puissance appelée entre l'hiver et l'été.

4.1.13.2. Les usages effaçables et les contraintes associées

Les data centers sont, en théorie, particulièrement adaptés aux effacements de consommation électrique. En effet, les data centers représentent des capacités importantes et en forte croissance pour le système électrique (donc un potentiel important), leur consommation est relativement stable sur une journée, les usages électriques sont hautement automatisés et pilotés de façon centralisée. Le fonctionnement des équipements informatiques et du refroidissement peut donc être ajusté et piloté en temps réel.

L'effacement de consommation sur les data centers peut en théorie avoir lieu :

- Sur la partie serveurs et processeurs
- Sur le refroidissement, en faisant varier par exemple la température de consigne
- Sur les deux

⁴⁰ Par ailleurs, comme le montre la Figure 77, les serveurs sont en moyenne sous-utilisés, puisque le taux d'utilisation ne dépasse pas les 50% sur un data center moyen.

En pratique, des contraintes métiers fortes limitent le potentiel d'effacement dans ce secteur (voir 4.1.13.3)

Effacement sur les serveurs et processeurs

L'effacement peut avoir lieu sur les serveurs et processeurs qui peuvent être soit éteints complètement (*units shutdown*) soit mis en veille (*servers idling*).

Pour que l'effacement ait lieu sur les serveurs via un arrêt des équipements, la file de requêtes en attente sur le serveur est annulée afin que toutes les applications sur les serveurs et processeurs s'arrêtent et l'arrêt des équipements informatiques est programmé. Les équipements de refroidissement (qui ont pour objectif de contrebalancer la chaleur produite par le serveur) sont également arrêtés pendant la durée de l'effacement. A la fin de la durée d'activation de l'effacement et avant le redémarrage des équipements IT (Information Technology), l'air conditionné et le refroidissement doivent être rétablis dans la salle des serveurs afin que les températures de consigne pour le fonctionnement des serveurs soient restaurées. Les serveurs et processeurs sont ensuite redémarrés de façon progressive afin d'éviter les rebonds trop importants et enfin les files d'attente des requêtes sur les serveurs reprennent.

L'effacement est par ailleurs possible en mettant un serveur partiellement en veille. La mise en veille est opérée grâce à un « module de réservation de capacité » qui met en attente les requêtes présentes dans la file pendant la durée de l'effacement. L'effacement peut également avoir lieu sur les serveurs de stockage et sauvegarde des données : les sauvegardes sont reprogrammées hors de la période d'effacement.

Effacement sur la production de froid

Il est par ailleurs envisageable de moduler la consommation de la production de froid. En effet, il est possible d'élever sur de courtes périodes de temps la température de consigne du système de refroidissement de la salle des serveurs, ou de la couper sur de très brèves périodes. La production d'eau glacée a pour objectif de compenser la montée en température des salles de serveurs due à la chaleur produite par le matériel informatique fonctionnant 24h/24. Cependant, le matériel informatique admet une certaine plage de température acceptable. Cette plage de température donne lieu à une durée potentielle d'effacement dépendant de plusieurs critères techniques :

- La température de consigne fixée en amont par l'opérateur du data center : si la température est initialement fixée à une valeur proche de la valeur maximale acceptable dans un souci d'efficacité énergétique, la marge restante en vue d'un effacement est très faible, voire nulle. En pratique, les exploitants réalisent déjà sur ce sujet une optimisation importante (consigne proche du maximal acceptable)
- Vétusté du matériel informatique : le matériel récent est en mesure de fonctionner à des températures plus élevées.
- Température extérieure : plus la température extérieure est faible, plus la durée de montée en température jusqu'au seuil maximal est importante.
- L'installation d'équipements de stockage de froid permettant de sur-refroidir en amont d'une diminution du refroidissement

Certains acteurs interrogés évoquent par exemple la possibilité de couper la production de froid pour des durées inférieures à 20 minutes, cette borne maximale constituant une limite risquée pour l'opérateur d'un data center à laquelle les serveurs peuvent arrêter de fonctionner.

4.1.13.3. Freins et barrières au développement des effacements

Aujourd'hui, bien que les data centers apparaissent comme des équipements théoriquement pertinents pour réaliser des effacements de process (forte consommation électrique, profils stables et équipements hautement pilotables à distance), aucune capacité d'effacement de process n'est valorisée à l'heure actuelle sur des data

centers. Dans le cas de data centers de grande taille, la question a souvent été étudiée par les gestionnaires de data centers et opérateurs d'effacement, cependant les barrières au développement d'effacements dans les data centers sont trop fortes pour les gestionnaires (contraintes économiques, techniques et organisationnelles).

Par ailleurs, une autre forme d'effacement est envisageable, celui par recours à des groupes électrogènes puisque les data centers en sont tous équipés (avec des back-ups sur l'ensemble de leurs équipements, voire un double back-up). Il existe un gisement potentiel d'effacement par autoproduction dans les data centers ; cependant ce gisement reste très peu exploité à l'heure actuelle car les contraintes de sécurité décrites ci-après sont jugées trop fortes.

- La principale contrainte, remontée par l'ensemble des gestionnaires de data centers, est la sécurité des données stockées sur les serveurs des data centers, c'est-à-dire la qualité du service de stockage de données. En effet, le data center, qu'il soit un hébergeur ou un data center corporate, a pour priorité de garantir la sécurité et l'accessibilité des données à tout instant. L'alimentation électrique des matériels informatiques et la température des salles de serveurs sont donc des priorités pour les gestionnaires de data centers.

Pour un data center corporate, les pertes liées à une indisponibilité des serveurs constituent un risque que la quasi-totalité des industriels gérant leurs propres data centers ne sont pas prêts à prendre actuellement, notamment en regard des rémunérations des effacements.

Concernant les data centers hébergeurs (ou en colocation d'espace de stockage), la contrainte peut être contractuelle. En effet, certains hébergeurs louent un espace de stockage que les clients viennent remplir avec leurs propres serveurs et les contrats de gestion et maintenance de ces serveurs peuvent entre autres inclure la température de consigne des salles de serveurs, l'impératif d'alimenter en continu la salle de serveurs et d'avoir des générateurs diesel de secours opérationnels.

- Par ailleurs, les possibilités de valoriser des effacements sur les data centers peuvent être limitées dans le cas où les gestionnaires mettent en place des mesures d'efficacité énergétique avancées. Ces mesures peuvent inclure :
 - l'optimisation de la production de froid destinée à refroidir les serveurs, grâce ou non à du *free-cooling* (technique consistant à refroidir partiellement le data center grâce à l'air extérieur)
 - l'optimisation de la répartition dans la journée des tâches qui ont la possibilité d'être traitées de façon décalée, les opérations de sauvegarde par exemple. Le reste des requêtes aux serveurs doit être traité instantanément, comme les calculs, messageries, pilotage et suivi des outils de production.
 - la virtualisation des serveurs afin de réduire la taille des data centers et répondre à l'explosion de la quantité de données. La virtualisation des serveurs consiste à faire fonctionner plusieurs serveurs virtuels sur un serveur physique dans l'objectif de mutualiser les capacités de chaque serveur et de maximiser la charge d'un serveur physique (un serveur peu chargé ne consomme pas moins d'électricité qu'un serveur exploitant tout son potentiel).

- Enfin, la multiplicité des acteurs peut être un frein au développement d'effacement. Dans le cas des data centers hébergeurs, qui louent des salles de serveurs à des entreprises installant leurs propres serveurs, les opportunités de valoriser des effacements sont limitées pour les gestionnaires de data centers. En effet, la vétusté des serveurs ainsi que la température de consigne ne sont pas homogènes entre les salles de serveurs, les hébergeurs ont donc une marge limitée leur interdisant la valorisation d'effacements.

Par ailleurs, la consommation d'électricité peut être totalement refacturée au client final par l'hébergeur qui de fait a peu d'intérêt à avoir recours à des effacements, ou même mesures d'efficacité énergétique, sinon pour des raisons commerciales ou préoccupations environnementales.

Dans le cas des data centers en « colocation » – les clients réservant auprès de l'hébergeur une capacité de stockage (non localisée), la refacturation des coûts énergie est au contraire le plus souvent forfaitisée. Ce modèle d'affaires incite donc l'opérateur du data center à réaliser des économies d'énergie et des effacements afin d'améliorer sa marge opérationnelle.

4.1.13.4. Estimation des gisements technique et technico-économique d'effacement (2016)

4.1.13.4.1. Estimation du gisement technique d'effacement de process

Le gisement technique est calculé sur la base des données et hypothèses suivantes :

- des données nationales de consommation électrique du secteur de ~3,4 TWh et de la répartition des consommations électriques par usage présentées en précédemment
- d'une hypothèse de profil de consommation constant sur l'année (consommation stable, en « ruban », sans pic de consommation)
- de l'hypothèse que seule la puissance des équipements de production de froid pour le refroidissement des serveurs peut être effacée, pendant une durée maximale de 15 minutes.

La durée maximale consécutive d'effacement est très faible pour ce secteur car le fonctionnement des équipements informatiques est très exothermique. Pour s'effacer au-delà des durées maximales consécutives d'activation, il est nécessaire de réaliser un « foisonnement » entre différents sites (c'est-à-dire effacer l'un après l'autre des équipements ou des sites, de manière cascado-cyclique). Ces hypothèses de foisonnement ont un impact sur le gisement d'effacement et sont prises en compte dans cette étude (de même que la compensation d'un potentiel effet report) dans l'analyse des gisements d'effacement sur des plus longues durées d'activation.

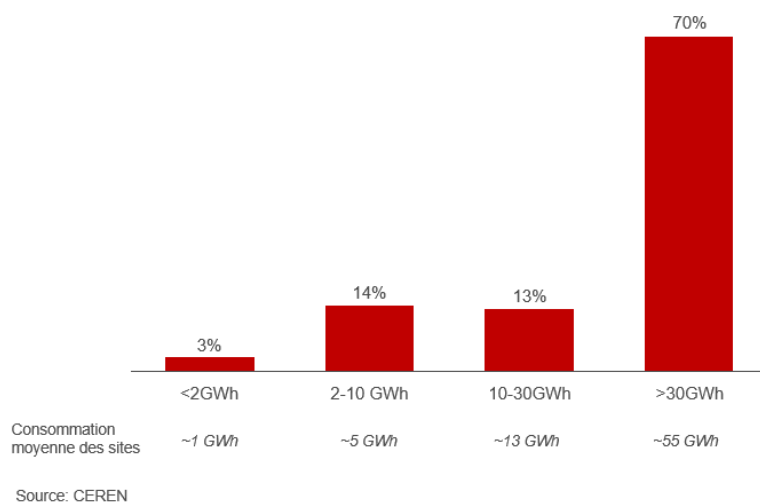
Le gisement technique dans ce secteur est **estimé à ~130-150 MW pour des effacements courts (de moins de 15 minutes consécutives)**. Pour des durées d'effacement supérieures, il peut être estimé à : **~50MW pour 30 minutes, <10 MW pour une durée supérieure à 2h** (voir Figure 78).

4.1.13.5. Gisement technico-économique d'effacement de process

Le gisement technico-économique du secteur est calculé sur la base de l'estimation de l'attente de rémunération des exploitants de *data centers* et à partir des estimations de gisements techniques précédents (voir 4.1.13.4.1).

La répartition des sites par taille est estimée ci-dessous par tranches de consommation électrique annuelle <2GWh, 2-10 GWh, 10-30 GWh, >30 GWh (Source : données de l'enquête Ceren 2013 réalisée auprès de data centers hébergeurs). Cette répartition permet d'estimer l'attente de rémunération ainsi que la puissance effaçable par site et donc l'attente de rémunération par kW_{effaçable}.

RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES DATA CENTERS PAR TAILLE DE SITE



Pour rappel, les hypothèses sur les attentes de rémunération par site sont prises comme suit :

Critère de mise en place	Sc. référence	Sc. bas	Sc. haut
Plancher minimal	20 k€/an	20 k€/an	20 k€/an
% attendu sur la facture électrique	5% ¹⁾	7%	3%
Plafond maximal	200 k€/an	300 k€/an	100 k€/an

1) Pour un site d'une consommation électrique ~10GWh/an, 5% de la facture électrique représente ~40 k€/an

Le gisement d'effacement est estimé comme accessible uniquement pour des rémunérations > 100 €/kW_{effacable}, ordre de grandeur de rémunérations aujourd'hui inaccessibles avec les mécanismes sur lesquels la majorité des capacités d'effacement sont valorisables. **L'intégralité du gisement d'effacement de process dans le secteur des data centers est en effet situé au-delà de 100€/kW/an.**

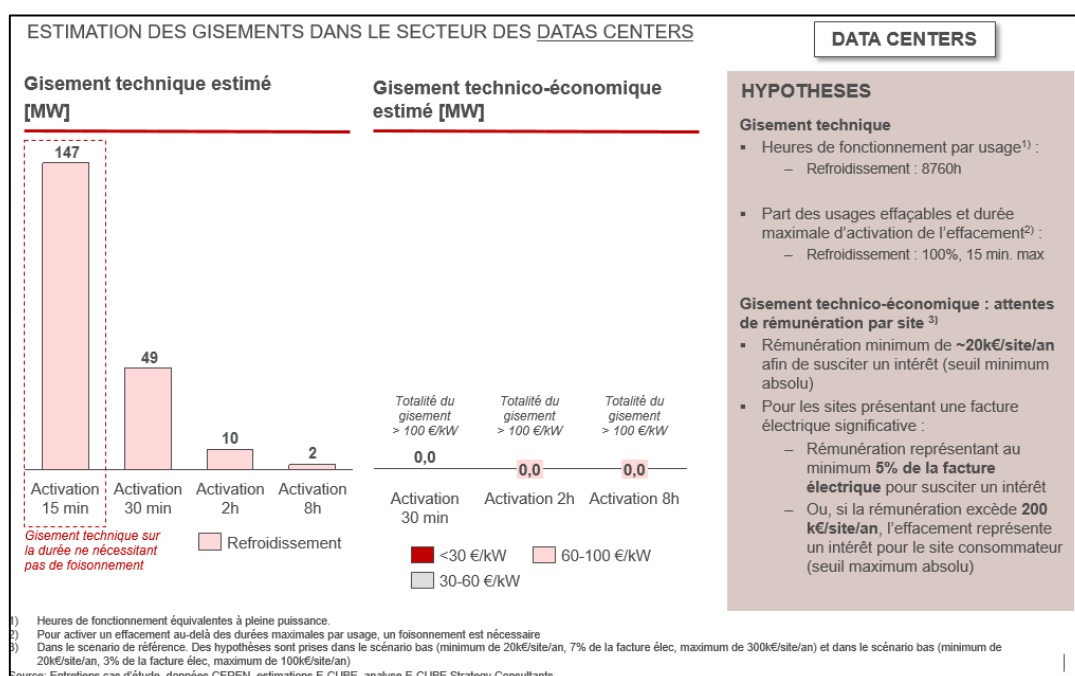


Figure 78 : [Data centers] Estimation des gisements technique et technico-économique actuels

4.2. Estimation des gisements techniques actuels à la maille nationale

4.2.1. Synthèse

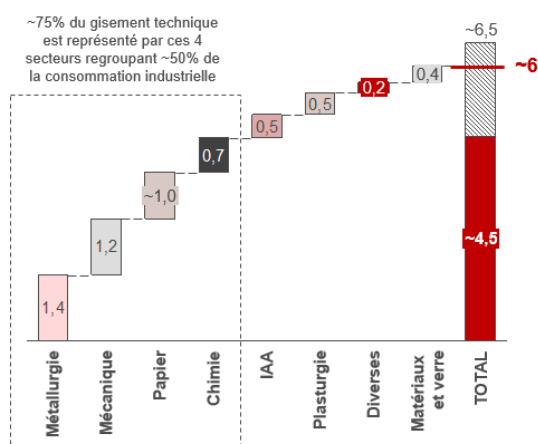
Le gisement technique a été estimé pour chacun des secteurs de l'industrie et du tertiaire étudiés sur trois durées d'activation (30 minutes, 2h et 8h) pour les différents usages effaçables de chaque secteur.

Les résultats de l'estimation donnent un **gisement technique d'effacement par modulation de process pour l'industrie et les secteurs du tertiaire analysés comprise entre 6,5 à 9,5 GW en cumulé avec un scénario de référence à 8,5 GW pour des durées d'effacement de 30 minutes** (voir Figure 79).

GISSEMENT TECHNIQUE INDUSTRIEL²⁾ [GW]

Pour un effacement de 30 min

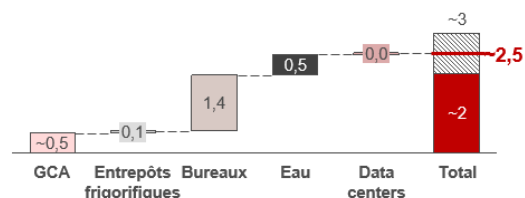
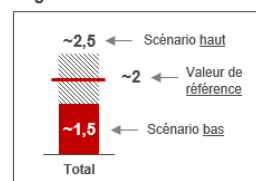
~75% du gisement technique est représenté par ces 4 secteurs regroupant ~50% de la consommation industrielle



GISSEMENT TECHNIQUE¹⁾ TERTIAIRE [GW]

Pour un effacement de 30 min

Légende



- 1) Scénario haut et bas estimés sur la base d'hypothèses de variation autour de la part de puissance effaçable par usage de +/-10 points (40% et 60% pour un hypothèse de référence à 50% pour le froid dans le grand commerce alimentaire par exemple)
- 2) Scénarios haut et bas estimés sur la base d'estimation, usage par usage, d'une hypothèse haute et basse sur la part de puissance effaçable (cf annexes)
- 3) Gisement accessible hors contraintes économiques

Source: Entretiens cas d'étude, données de consommation CEREN, bases de données E-CUBE, analyses CEREN & E-CUBE Strategy Consultants

Figure 79 : Estimation de gisement technique dans l'industrie et le tertiaire en France

Sur ces 8,5 GW de gisement technique, 70% (soit ~5,7 GW) proviennent des effacements de process dans les secteurs industriels, et 30% des effacements de process dans les secteurs tertiaires étudiés.

Dans l'industrie, les secteurs majoritaires représentant le gisement technique sont la métallurgie (24% du gisement), la mécanique (20%), le papier (14%) et la chimie (13%). Pour rappel, les parts de la consommation électrique de ces secteurs parmi la consommation électrique de l'industrie sont : 20% pour la chimie, 15% pour la métallurgie, 19% pour la mécanique et 8% pour le papier. Ces écarts, notamment pour la métallurgie et le papier, s'expliquent par le fait que les parts effaçables sont en moyenne plus élevées dans ces secteurs que dans la majorité des autres secteurs.

Dans le tertiaire, les secteurs majoritaires sont **les bureaux** (constituant plus de 50% du gisement technique) ainsi que les secteurs du **grand commerce alimentaire** (20% du gisement) et de **l'eau** (20% du gisement). Le secteur des entrepôts frigorifiques est minoritaire car ce secteur représente une puissance disponible limitée ; de même le secteur des data centers est également minoritaire, principalement car les contraintes d'activation sont fortes sur les usages effaçables du secteur.

Par ailleurs, les principaux usages effaçables, sont :

- **Pour l'industrie** : les usages thermiques qui comprennent les usages « chaleur » (type fours, cuisson) à 44%, les usages moteurs (hors froid) à 27% et les usages froid à 15% (voir Figure 82).
- **Pour le tertiaire** : les usages thermiques qui comprennent le froid, la climatisation et le chauffage et représentent plus de 50% du gisement de consommation électrique effaçable pour les secteurs du tertiaire étudiés (voir Figure 86).

Certains usages sont effaçables sur des durées consécutives limitées (les usages thermiques par exemple, en particulier ceux qui sont liés au confort ou à des contraintes sanitaires). Pour des durées d'activation plus longues que les durées maximales consécutives d'activation de chaque usage, il est nécessaire, d'une part, de « foisonner » entre différents sites (effacement l'un après l'autre des équipements ou des sites, de manière cascado-cyclique), et d'autre part de tenir compte de l'effet report potentiel qui peut avoir lieu immédiatement après l'effacement. Ainsi, si la durée d'activation requise augmente, la puissance effaçable à un instant t pour répondre au besoin diminue car on souhaite estimer le gisement disponible sur la base d'une garantie de puissance

constante valorisable sur toute la durée. Les hypothèses de durées maximales d'activation et de report sont rappelées pour chaque usage en annexe de ce rapport.

Il apparaît dans les estimations de gisements à la maille nationale pour l'industrie et le tertiaire que la plupart des effacements du secteur industriel sont effaçables sur de longues durées, ce qui rend le gisement technique d'effacement par modulation de process dans l'industrie relativement peu sensible à la durée d'activation. Ce n'est pas le cas dans le secteur tertiaire. En effet, le gisement technique étant constitué à ~50% d'usages thermiques, c'est-à-dire reposant sur l'inertie thermique du bâtiment ou des équipements (froid dans les réfrigérateurs par exemple), les durées d'activation sont limitées. Par ailleurs, les usages thermiques dans le tertiaire sont pilotés par des consignes de température qui impliquent un effet report de consommation après l'activation de l'effacement, réduisant a fortiori le gisement disponible pour réaliser un effacement de longue durée.

En effet, le gisement technique baisse de 22% dans l'industrie lorsque la durée d'activation de l'effacement passe de 30 minutes à 8h, alors qu'il baisse de plus de 70% dans le tertiaire (voir Figure 80).

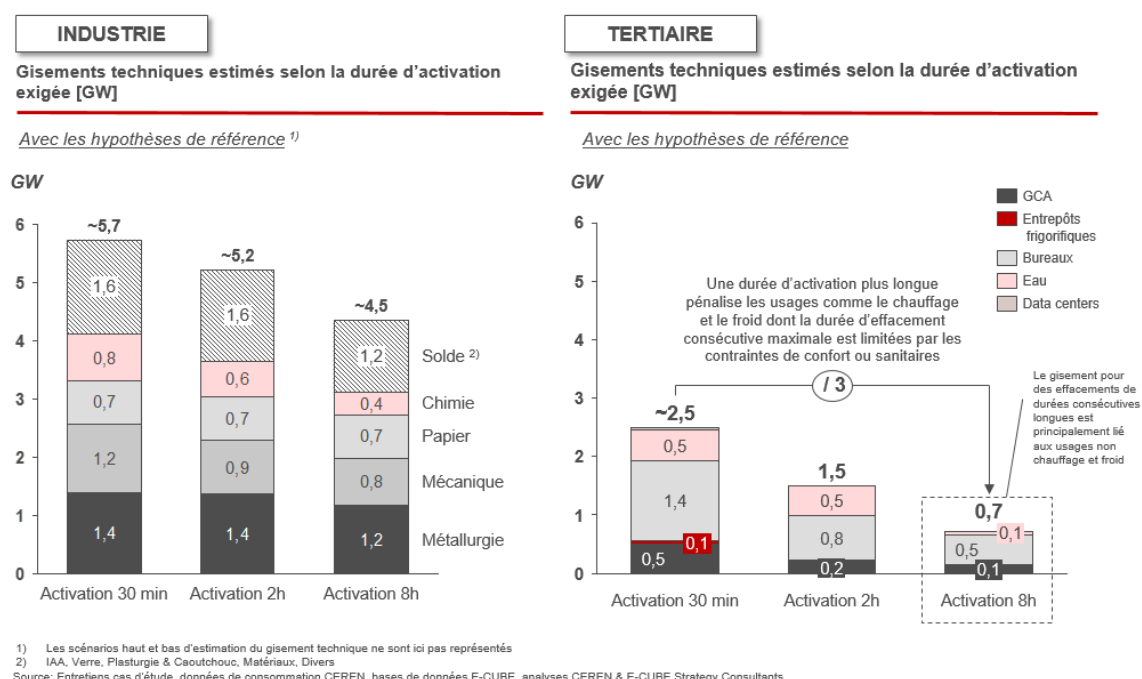


Figure 80 : Gisements techniques en fonction de la durée d'activation

4.2.2. Gisement technique industrie

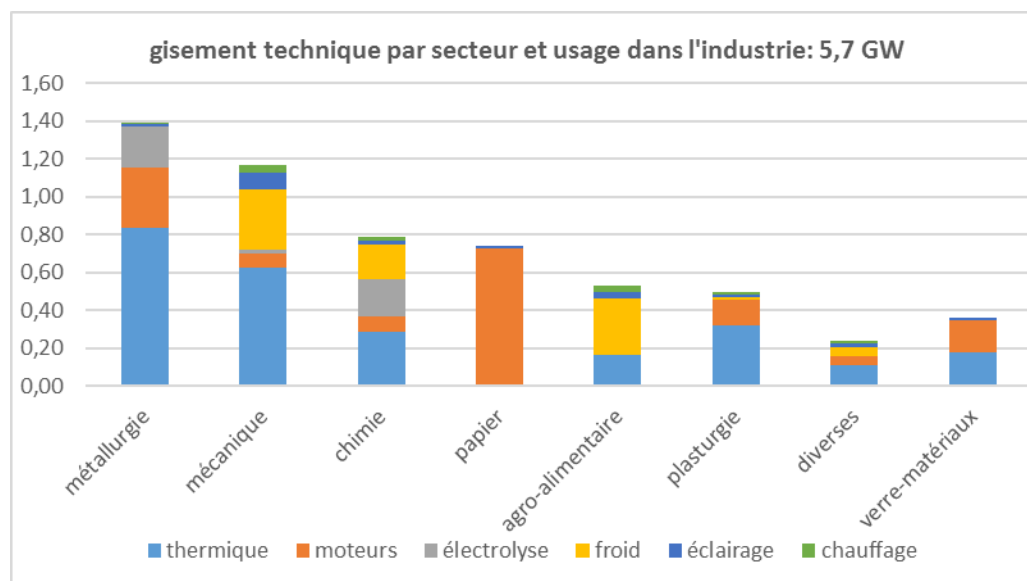


Figure 81 : Gisement technique industriel par secteur et par usage

Pour un effacement d'une demi-heure, le gisement technique dans l'industrie est estimé à près de 6 GW, dans une fourchette de 4,5 à 6,6 GW.

Le bas de la fourchette correspond à des hypothèses basses des parts de puissance effaçable par usage, le haut de la fourchette à des hypothèses hautes de ces parts.

Les hypothèses basses, moyennes et hautes de ces parts sont indiquées en annexe.

Elles sont résumées dans le tableau suivant :

Puissance effaçable basse, moyenne et haute par secteur d'activité (GW)

Secteurs industriels	Valeurs des gisements techniques		
	Basses	Moyennes	Hautes
Métallurgie	1,16	1,40	1,61
Mécanique	0,84	1,17	1,40
Chimie	0,68	0,80	0,93
Papier	0,70	0,74	1,01
Agro-alimentaire	0,41	0,53	0,64
Plasturgie-caoutchouc	0,35	0,50	0,52
Matériaux non-métalliques (verre, matériaux)	0,29	0,36	0,40
Autres secteurs	0,19	0,24	0,28
Total	4,63	5,74	6,79

C'est un gisement concentré à plus de 70% dans 4 secteurs :

- 25% dans la métallurgie
- 21% dans la mécanique
- 14% dans la chimie
- 13% dans le papier.

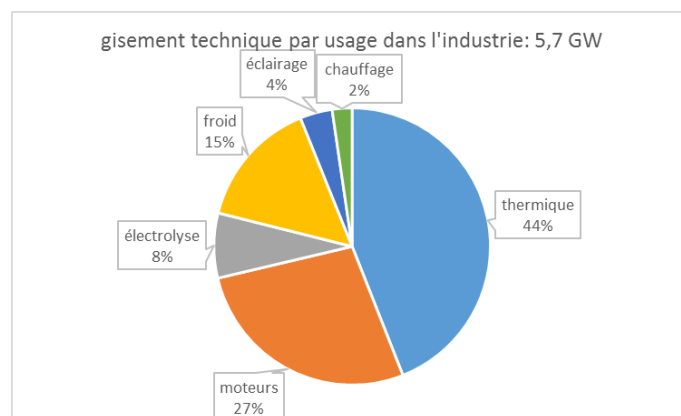


Figure 82 : Gisement technique industriel par usage (activation de 30 minutes)

Le gisement technique est fortement concentré par usage, et notamment dans les usages thermiques (fours électriques essentiellement) et les moteurs (Figure 82).

La répartition du gisement technique diffère très sensiblement de la répartition de la consommation électrique dans l'industrie (Figure 83).

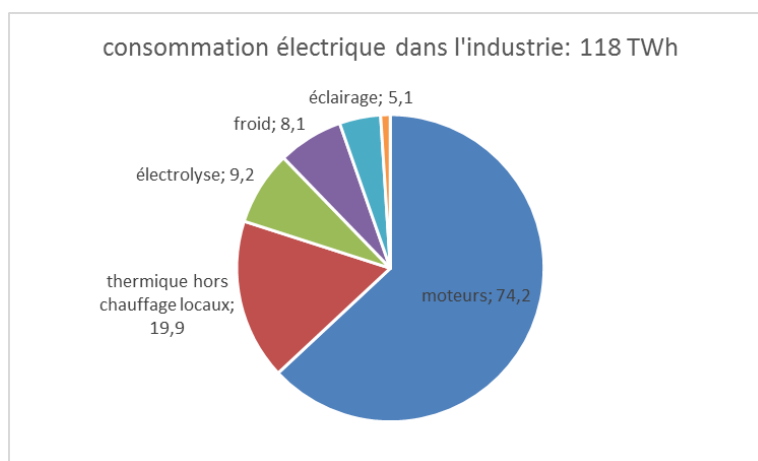


Figure 83 : Consommation nationale électrique de l'industrie (CEREN, 2013)

Les usages thermiques (hors chauffage des locaux) et le froid sont de loin les usages les plus propices à l'effacement, à l'inverse des moteurs.

À l'exception du secteur du papier, les usages thermiques (hors chauffage des locaux) constituent le premier poste, tout du moins un poste important (par exemple, 60% dans la métallurgie, 64% dans la plasturgie), dans le gisement technique de chacun des secteurs d'activité. Le secteur du papier se singularise par un gisement quasiment entièrement réalisé sur des usages moteurs.

Le froid est le premier usage effaçable dans l'agro-alimentaire, et c'est un usage effaçable important dans la chimie et la mécanique.

L'électrolyse est un usage effaçable important dans la métallurgie et dans la chimie.

Le secteur de la chimie se caractérise par un gisement technique multi-usages assez équilibré.

Evolution du gisement technique selon la durée d'effacement

Dans l'industrie, la plupart des usages effaçables, et notamment ceux liés au process, peuvent être techniquement arrêtés ou ralentis pendant une durée assez longue, jusqu'à 8 heures, voire plus, même si une durée d'effacement plus longue peut se traduire par une remise en route sensiblement allongée.

En revanche, les usages thermosensibles tels que le chauffage des locaux et le froid ne peuvent pas être arrêtés au-delà d'une durée de 1 à 3 heures. L'électrolyse est également un usage qu'on n'efface pas en général plus de 2 heures. Un effacement plus long nécessite donc un foisonnement qui diminue très sensiblement le gisement technique pour une durée longue.

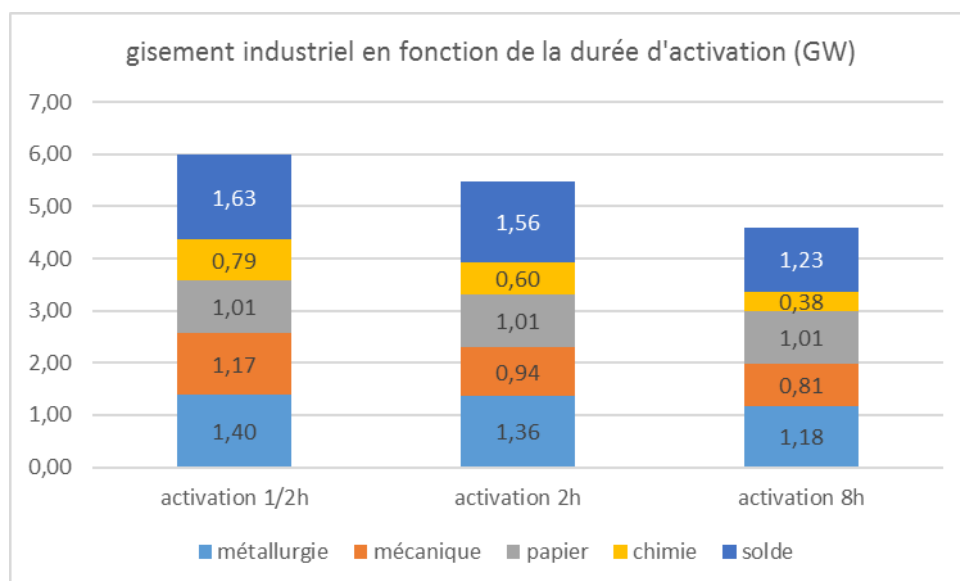


Figure 84 : Gisement technique dans l'industrie par durée d'activation

Le gisement technique d'effacement pour une durée de 2 heures est de 5,2 GW, inférieur seulement de 9% au gisement technique pour une durée d'effacement d'une demi-heure.

Pour une durée d'effacement de 8 heures, le gisement technique passe à 4,3 GW, 24% au-dessous du gisement technique pour une durée d'une demi-heure.

Ces diminutions sont variables d'un secteur à l'autre : le gisement dans le secteur des matériaux ou dans celui du verre est invariable quelle que soit la durée d'effacement, tandis que le gisement technique dans la chimie chute de plus de moitié entre une durée d'une demi-heure et une durée de 8 heures, ce qui s'explique par le poids important d'usages effaçables (froid, électrolyse) seulement une à deux heures.

4.2.3. Gisement technique pour les secteurs tertiaires étudiés

Le gisement technique a été estimé pour chacun des secteurs du tertiaire étudiés sur trois durées d'activation (30 minutes, 2h et 8h) pour les différents usages effaçables de chaque secteur.

Les résultats de l'estimation donnent un **gisement technique d'effacement pour les 5 secteurs du tertiaire analysés de 2 à 3 GW avec un scénario de référence à 2,5GW pour des durées d'effacement de 30 minutes** (voir Figure 85).

Sur ces 2,5GW de gisement technique, les secteurs majoritaires sont **les bureaux** (constituant plus de 50% du gisement technique) ainsi que les secteurs du **grand commerce alimentaire** (20% du gisement) et de **l'eau** (20% du gisement). Le secteur des entrepôts frigorifiques est minoritaire car ce secteur représente une puissance disponible limitée ; de même le secteur des data centers est également minoritaire, principalement car les contraintes d'activation sont fortes sur les usages effaçables du secteur.

Par ailleurs, les principaux usages effaçables, sur des durées d'activation courtes de 30 minutes, sont **les usages thermiques qui comprennent le froid, la climatisation et le chauffage et représentent plus de 50% du gisement de consommation électrique effaçable pour les secteurs du tertiaire étudiés** (voir Figure 86).

Les autres usages sont les usages spécifiques au secteur de l'eau (le pompage et l'aération) qui représentent 25% du gisement technique, et l'éclairage représentant ~25% du gisement technique. **Il convient de noter que le gisement technique provenant de l'effacement des usages d'éclairage est un gisement qui n'est pas actuellement exploité en France, et sur lequel les acteurs du tertiaire se penchent aujourd'hui sur la question de l'effacement** (dans les bureaux et le grand commerce alimentaire) ne souhaitent pas se positionner, l'éclairage constituant un enjeu clé pour le confort des employés travaillant dans les bureaux ou pour maintenir des conditions optimales pour les ventes dans les supermarchés ou hypermarchés. L'effacement de l'éclairage fait pourtant partie intégrante du gisement technique, ces effacements étant aujourd'hui valorisés aux Etats Unis par exemple.

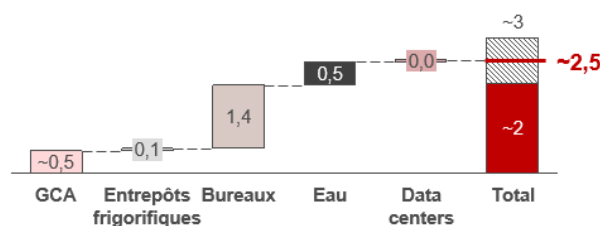
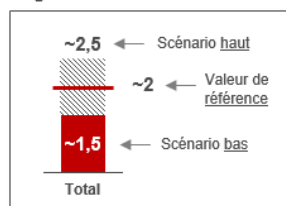
Par ailleurs, le gisement technique étant constitué à ~50% d'usages thermiques, c'est-à-dire reposant sur l'inertie thermique du bâtiment, les durées d'activation sont limitées. Ainsi, pour des durées d'activation plus longues que les durées maximales consécutives d'activation de chaque usage, il est nécessaire, d'une part, de «foisonner» entre différents sites (effacement l'un après l'autre des équipements ou des sites, de manière cascado-cyclique), et d'autre part de tenir compte de l'effet report lié au besoin de compenser l'absence de refroidissement/chauffage pendant la période d'effacement sur les différents usages. Ainsi, si la durée d'activation requise augmente, la puissance effaçable à un instant t pour répondre au besoin diminue. Les hypothèses de durées maximales d'activation et de report sont rappelées pour chaque usage en annexe de ce rapport.

Ainsi, dans le scénario de référence, le gisement technique est de l'ordre de **2,5 GW pour une durée d'activation de 30 minutes**, de **1,5 GW pour une durée d'activation de 2h** et de l'ordre de **0,7GW pour une durée d'activation de 8h**.

GISSEMENT TECHNIQUE¹⁾²⁾ TERTIAIRE [GW]

Pour un effacement de 30 min

Légende

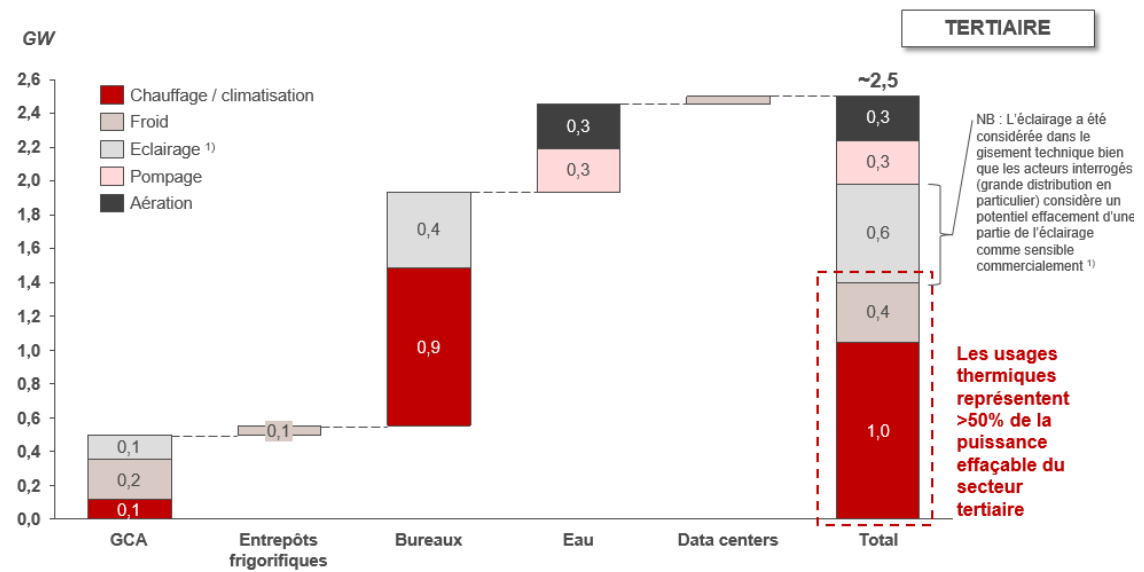


- 1) Scénario haut et bas estimés sur la base d'hypothèses de variation autour de la part de puissance effaçable par usage de +/-10 points (40% et 60% pour un hypothèse de référence à 50% pour le froid dans le grand commerce alimentaire par exemple)
- 2) Gisement accessible hors contraintes économiques

Source: Entretiens cas d'étude, données de consommation CEREN, bases de données E-CUBE, analyses CEREN & E-CUBE Strategy Consultants

Figure 85 : Estimation du gisement technique tertiaire pour 30 minutes d'effacement

GISEMENT TECHNIQUE PAR SECTEUR ET PAR USAGE DANS LE TERTIAIRE – HYPOTHESES DE REFERENCE [GW]

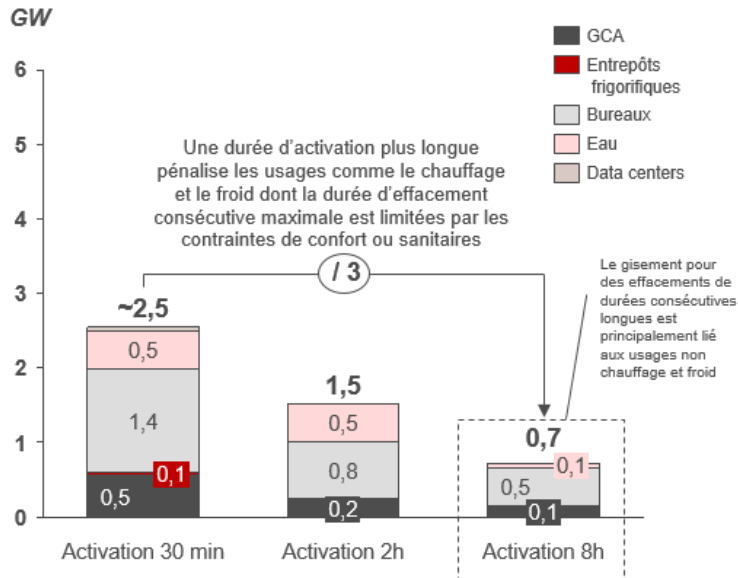


1) Seul 25% des consommations d'éclairage ont été considérées comme effaçables (ordre de grandeur du niveau de puissance d'éclairage effacé dans la grande distribution aux USA)
 Source: Entretiens cas d'étude, données de consommation CEREN, bases de données E-CUBE, analyses E-CUBE Strategy Consultants

Figure 86 : Détails du gisement technique par usage et par secteur

Gisements techniques estimés selon la durée d'activation exigée [GW]

Avec les hypothèses de référence



Source: Entretiens cas d'étude, données de consommation CEREN, bases de données E-CUBE, analyses CEREN & E-CUBE Strategy Consultants

Figure 87 : Gisements techniques dans le tertiaire estimés selon la durée d'activation

4.3. Estimation des gisements technico-économiques actuels à la maille nationale

4.3.1. Synthèse : gisement technico-économique à la maille nationale

L'estimation des gisements techniques pour chacun des secteurs donne une vision des gisements potentiellement réalisables hors contraintes de rentabilité économique des investissements qui peuvent être réalisés pour mettre en place des effacements. La prise en compte de ces coûts conduit à estimer un gisement qui serait « technico-économique », c'est-à-dire une capacité qui serait « accessible » pour un niveau de rémunération donné. Les coûts pris en compte peuvent être des investissements dans des équipements de pilotage des installations consommatrices d'électricité, des coûts de formation des personnels, ou pertes de production suite à l'activation d'un effacement.

L'estimation du gisement technico-économique d'effacement au périmètre de cette étude est réalisée secteur par secteur. Elle est fondée sur une méthodologie décrite au paragraphe 3 et rappelée :

- la répartition des sites d'un secteur par taille (puissance souscrite, consommation unitaire du site, taille)
- un raisonnement économique qui s'appuie, pour la plupart des secteurs étudiés, sur une approche « *top down* » simplifiée fondée sur les attentes de rémunération annuelles d'un site de taille moyenne pour mettre en œuvre des effacements (i.e. se rendre disponible pour un potentiel effacement) et, pour certains secteurs, sur une approche « *bottom-up* » visant à reconstituer les coûts de développement des effacements et le temps de retour sur investissements attendu par les acteurs (secteurs du tertiaire du grand commerce alimentaire, des entrepôts de froid et des bureaux).

Critère de mise en place	Sc. référence	Sc. bas	Sc. haut
Plancher minimal	20 k€/an	20 k€/an	20 k€/an
% attendu sur la facture électrique	5% ¹⁾	7%	3%
Plafond maximal	200 k€/an	300 k€/an	100 k€/an

1) Pour un site d'une consommation électrique ~10GWh/an, 5% de la facture électrique représente ~40 k€/an

Ainsi, les estimations pour les différents scénarios permettent d'avoir une vision du gisement économiquement accessible en fonction d'une rémunération annuelle donnée de la capacité d'effacement disponible (en €/kW/an).

A titre de comparaison, le seuil de rémunération de ~30€/kW/an correspond aux niveaux de rémunération maximale à l'heure actuelle des mécanismes sur lesquels les effacements sont aujourd'hui valorisés en France, et le seuil de rémunération de ~60€/kW/an correspond aux coûts d'une nouvelle turbine à combustion gaz (et constitue donc un seuil au-delà duquel il pourrait devenir plus économique d'installer une nouvelle centrale de production que de mettre en place des effacements)

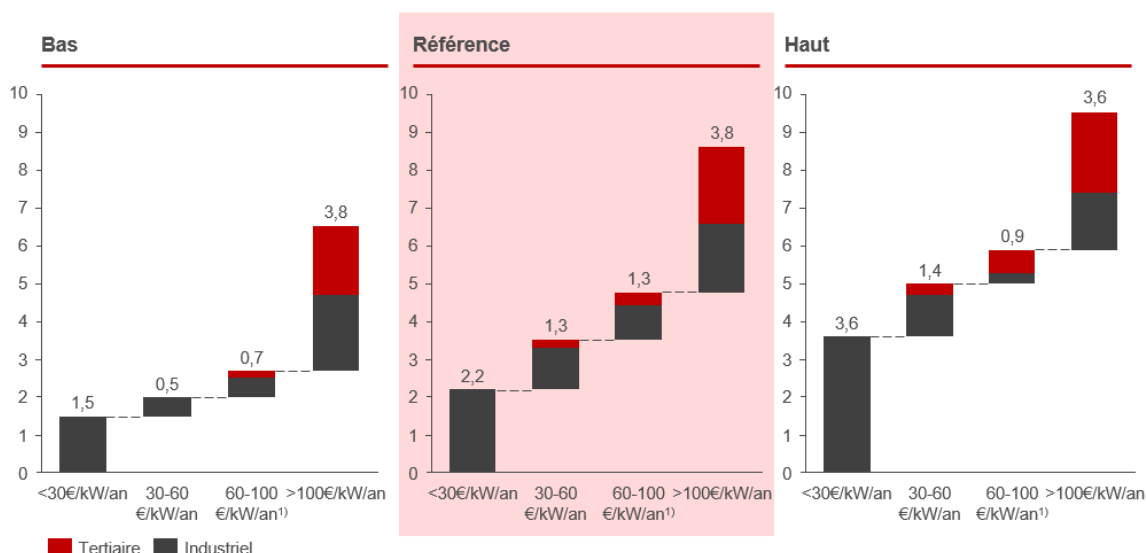
Ces estimations de gisements technico-économiques sont (pour des effacements d'une durée de 30 minutes) (voir Figure 88) :

- pour des rémunérations de ~30€/kW/an ou moins : entre ~1,5 et ~3,6 GW d'effacements économiquement accessibles à ce niveau de rémunération (avec un scénario de référence à ~2,2 GW) principalement concentrés dans les secteurs de l'industrie. Les principaux secteurs accessibles économiquement à 30€/kW/an sont la métallurgie, la chimie et le papier, soit les secteurs électro-

intensifs qui pratiquent déjà l'effacement de process et maximisent déjà les effacements réalisables sur leurs process en vue de diminuer la facture énergétique des sites.

- Pour des rémunérations entre ~30€/kW/an et ~60€/kW/an : entre ~2 et ~5 GW d'effacements économiquement accessibles à ces niveaux de rémunération (avec un scénario de référence à ~3,5 GW) intégrant à la fois des effacements industriels et tertiaires dans une moindre mesure (0 à 0,3 GW). En passant de niveaux de rémunération de 30 à 60€/kW/an, entre 0,5 et 1,5 GW sont estimés comme devenant économiquement accessibles et les secteurs additionnels (pour lesquels la rémunération nécessaire est située entre 30 et 60 €/kW/an) sont le papier (et notamment, les sites de taille moyenne), la plasturgie et la mécanique (sur des sites de grande taille). Les effacements tertiaires sont principalement des effacements sur des sites type hypermarchés de très grande taille qui présentent des gisements unitaires plus importants que la majorité des sites tertiaires.
- Pour des rémunérations entre 60 et 100€/kW/an : les gisements « additionnels » accessibles entre 60 et 100€/kW/an sont principalement des sites de plus petite taille - dans l'industrie comme le tertiaire - sur des secteurs comme le grand commerce alimentaire, mécanique, chimie, entrepôts frigorifiques
- Au-delà de 100€/kW/an, les gisements accessibles sont concentrés sur les sites présentant des gisements unitaires plus faibles, dans le tertiaire comme l'industrie. On constate que la majorité du gisement technique dans le tertiaire devient économiquement accessible au-delà de 100€/kW/an (>80%), contrairement à l'industrie (seulement 25% du gisement nécessitant une rémunération de plus de 100€/kW/an pour devenir accessible).

GISEMENT TECHNIQUE-ÉCONOMIQUE DES SECTEURS INDUSTRIELS ET TERTIAIRES (SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE, BAS ET HAUT) [GW]



1) 60 €/kW/an est pris ici comme seuil de référence car cette valeur correspond en ordre de grandeur aux coûts fixes annuels d'une Turbine à Combustion et représente donc d'un point de vue théorique un plafond de valeur pour les capacités d'effacement
Source: Entretiens cas d'études, données CEREN, bases de données E-CUBE, CRE, Insee, analyses E-CUBE Strategy Consultants & CEREN

Figure 88 : Estimation du gisement technico-économique d'effacement

Effacements sur des durées plus longues

Pour les usages pour lesquels la durée d'effacement consécutive est limitée dans le temps, il est nécessaire de foisonner les sites entre eux afin de permettre une activation sur des durées plus longues. Le foisonnement a pour effet de diminuer le gisement disponible pour un effacement à un instant t. La rémunération nécessaire par site restant par ailleurs constante, la rémunération nécessaire par kW d'effacement augmente et les gisements économiques à un niveau de rémunération donné diminuent.

Ainsi, dans l'**industrie**, les gisements techniques étant peu impactés par les effets de foisonnement, les estimations de gisements technico-économique sur **une durée d'activation de 8h** (voir 4.3.2):

- pour une rémunération de 30 €/kW, diminue de ~23% par rapport à 30 min d'activation
- pour une rémunération de 60 €/kW, diminue de ~20% par rapport à 30 min d'activation

Les effacements de consommation par modulation de process sont donc adaptés à des effacements de longue durée, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour tous les secteurs du tertiaire.

Cependant, dans les **secteurs du tertiaire** analysés, les estimations de gisements technico-économiques (voir Figure 93) pour des durées plus longues d'effacement conduisent à des gisements (à des rémunérations de ~100€/kW/an) très faibles:

- Entre 0 et 200MW pour des effacements de l'ordre de **2h d'activation**
- Proche de 0 MW pour des effacements de l'ordre de **8h d'activation**

Il apparaît donc que les effacements de consommation par modulation de process dans les secteurs analysés du tertiaire (grand commerce alimentaire, entrepôts frigorifiques, traitement et distribution de l'eau, bureaux et data centers) sont des effacements plus adaptés à des effacements de courte durée, les gisements (qu'ils soient techniques ou technico-économiques) décroissant de façon importante avec l'allongement de la durée d'activation.

4.3.1. Gisement technico-économique industrie

Scénarios bas, médian et haut

Les scénarios combinent des hypothèses sur le calcul du gisement technique et sur le calcul de l'attente de rémunération de la puissance effaçable.

Le scénario moyen ou médian correspond aux parts moyennes effaçables par secteur x usage et une attente de rémunération d'au moins 20 000 € par an et d'au moins 5% de la facture électrique, cette attente de rémunération étant plafonnée à 200 k€ par an.

Le scénario bas correspond aux parts basses effaçables par secteur x usage et des hypothèses plus défavorables pour le calcul du gisement technico-économique (la rémunération attendue devant être au moins de 7% de la facture électrique, et son plafonnement étant augmenté à 300 k€ par an).

Le scénario haut correspond à l'inverse aux parts hautes effaçables par secteur x usage et des hypothèses plus favorables pour le calcul du gisement technico-économique (la rémunération attendue devant être au moins de 3% de la facture électrique, et son plafonnement étant diminué à 100 k€ par an).

Critère de mise en place	Sc. référence	Sc. bas	Sc. haut
Plancher minimal	20 k€/an	20 k€/an	20 k€/an
% attendu sur la facture électrique	5% ¹⁾	7%	3%
Plafond maximal	200 k€/an	300 k€/an	100 k€/an

1) Pour un site d'une consommation électrique ~10GWh/an, 5% de la facture électrique représente ~40 k€/an

Pour chacun des gisements techniques par secteur et niveau de puissance, 3 attentes de rémunération ont été ainsi calculées selon les scénarios.

Ces gisements ont été triés par attente de rémunération croissante, puis cumulés, ce qui conduit aux courbes ci-après.

Gisements technico-économiques pour un effacement d'une demi-heure

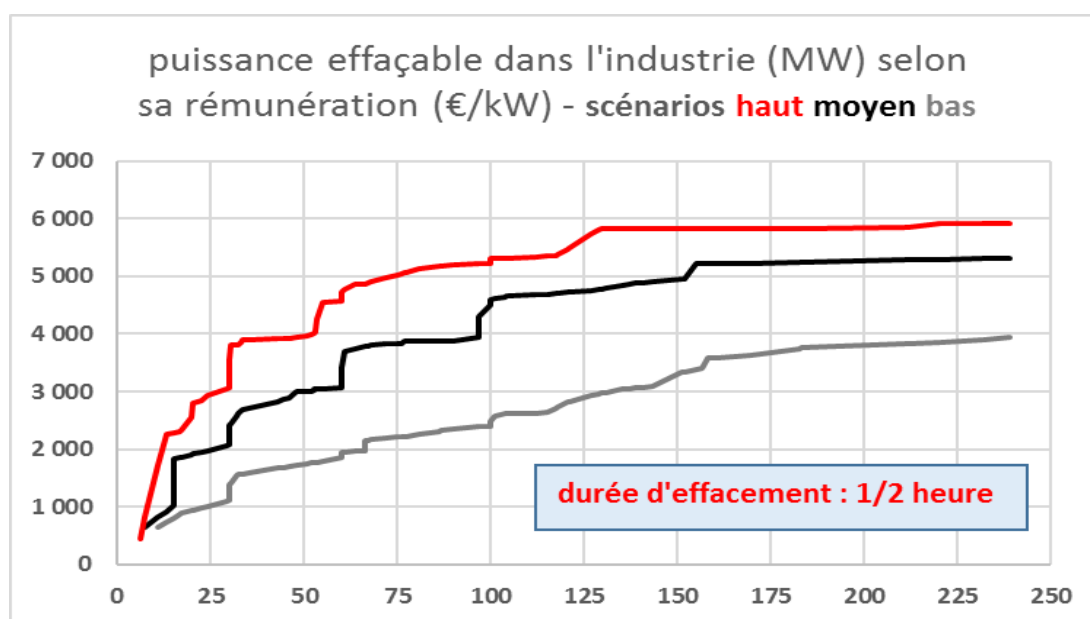


Figure 89 : Gisement technico-économique d'effacement industriel pour une durée de 30 minutes en fonction de la rémunération

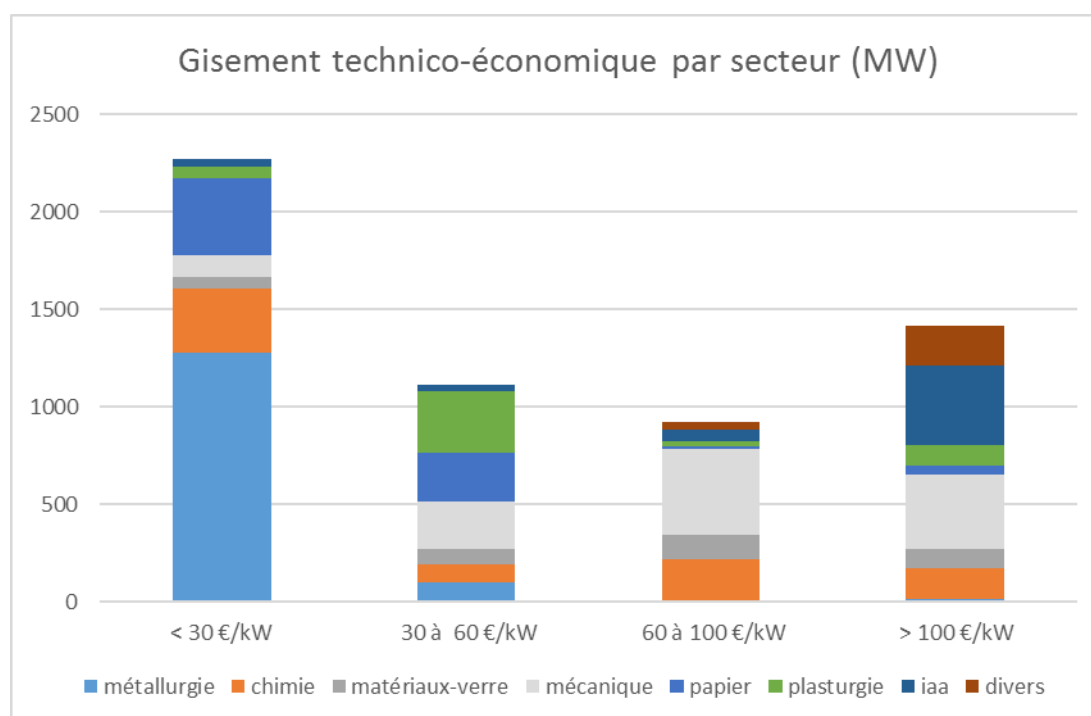
Pour une attente de rémunération de 30 €/kW, le gisement technico-économique d'effacement est compris dans une fourchette d'1,5 à 3,6 GW.

Pour une attente de rémunération de 60 €/kW, le gisement est compris dans une fourchette de 2 à 3,6 GW.

Avec le scénario médian, on remarque que la puissance effaçable atteint 1 GW pour une attente de rémunération de 14 €/kW, 2,2 GW pour une attente de rémunération de 30 €/kW, 3 GW pour une attente de rémunération de 60 €/kW et 4 GW pour une attente de rémunération de 97 €/kW.

En prenant en compte les scénarios bas et haut, 1 GW effaçable est obtenu pour une attente de rémunération entre 10 et 30 €/kW, 2 GW effaçables sont obtenus pour une attente de rémunération de 13 à 60 €/kW, 3 GW effaçables sont obtenus pour une attente de rémunération entre 60 et 130 €/kW.

Gisement technico-économique pour un effacement d'une demi-heure avec le scénario médian



Pour une durée d'effacement d'une demi-heure, le gisement technico-économique actuel est dans une fourchette d'1,5 à 3,6 GW, et avec le scénario médian de 2,2 GW, soit 40% du gisement technique.

Ce gisement est concentré dans environ 150 établissements gros consommateurs d'électricité, très souvent ayant une puissance souscrite d'au moins 20 MW. Le plus fort contingent (une quarantaine) appartient au secteur de la métallurgie, devant le secteur du papier, la mécanique, la chimie et la plasturgie (entre 15 et 30 par secteur). **Leur puissance moyenne appelée minimale varie d'une dizaine de MW dans la plasturgie à une quarantaine de MW dans le secteur des matériaux.**

La consommation minimale des sites concernés est autour d'une centaine de GWh par an, dans une fourchette qui part d'une cinquantaine de GWh dans la plasturgie à environ 160 GWh dans la chimie.

Ce gisement est concentré dans 3 secteurs d'activité, en premier lieu, la métallurgie (56%), le papier (18%) et la chimie (15%). Ce sont bien des secteurs qui sont actuellement sollicités de manière notable pour s'effacer.

Le gisement technico-économique additionnel, correspondant à une attente de rémunération entre 30 et 60 €/kW est de 1,1 GW, soit 19% du gisement technique.

Ce gisement additionnel a une répartition sectorielle différente et plus équilibrée, avec une part importante de la plasturgie et du caoutchouc (29%), puis du papier (22%) et de la mécanique (22%)

Gisement technico-économique pour une durée d'effacement de 8 heures

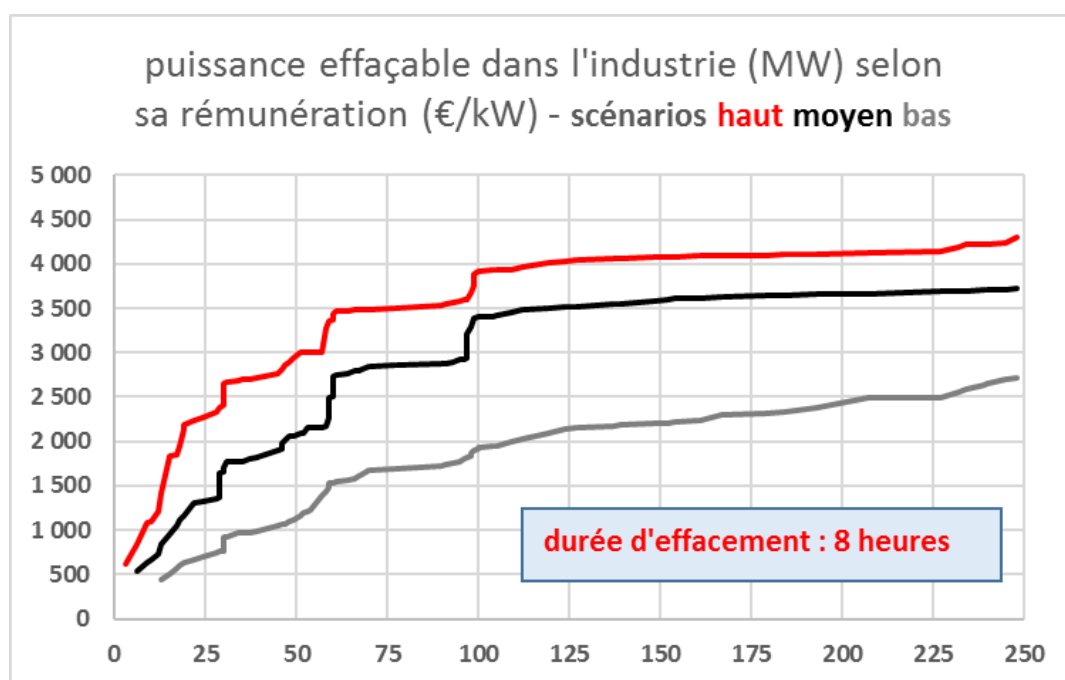


Figure 90 : Gisement technico-économique industriel pour une durée d'effacement de 8 heures en fonction de la rémunération

Le gisement technique et le gisement technico-économique diminuent avec la durée de l'effacement, de manière faible entre ½ h et 2 h, de manière plus sensible pour une durée de 8 h.

Pour une attente de rémunération de 30 €/kW, le gisement technico-économique d'effacement est dans une fourchette de 0,9 à 2,6 GW.

Pour une attente de rémunération de 60 €/kW, le gisement est dans une fourchette d'1,5 à 3,4 GW.

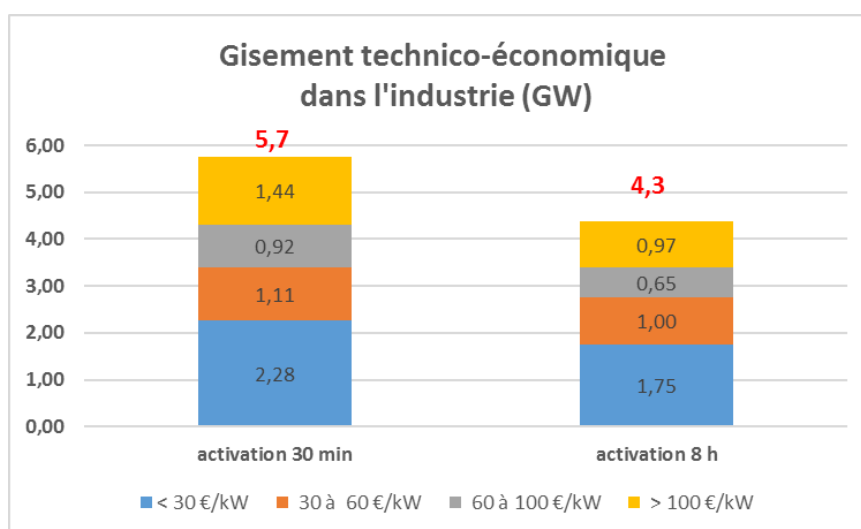


Figure 91 : Comparaison des gisements technico-économiques industriels pour des activations de 30 min et 8h

Le gisement technico-économique pour une attente de rémunération de 30 €/kW diminue de 23% pour une durée d'effacement passant d'1/2 à 8 heures.

Le gisement technico-économique pour une attente de rémunération de 60 €/kW diminue de 3,4 GW à 2,7 GW (soit de 19%) pour une durée d'effacement passant d'1/2 à 8 heures

4.3.2. Gisement technico-économique d'effacement dans les secteurs tertiaires étudiés

Suite à l'estimation du gisement technique pour l'ensemble des secteurs tertiaires étudiés (pour une durée d'activation de 30 minutes, il est estimé entre 2 et 3 GW), la prise en compte des attentes de rémunérations et coûts de mise en œuvre des effacements (équipements de pilotage) permet de donner une vision de la part de ce gisement technique qui est accessible économiquement en fonction de la rémunération. Pour rappel, pour chaque secteur, le gisement technique est divisé en tranches en fonction de la taille moyenne des sites et les rémunérations des effacements nécessaires évoluent en fonction de la taille des sites (les sites de tailles plus importantes nécessitent des rémunérations inférieures aux sites de tailles moins importantes)

L'estimation des gisements technico-économiques pour chacun des secteurs étudiés montre qu'aujourd'hui, à des niveaux de rémunération actuels (soit de l'ordre de 30€/kW/an), les gisements techniques estimés précédemment ne sont pas économiques (pour des durées d'activation courtes). En effet, le gisement économiquement accessible à des niveaux de rémunération inférieurs à 30€/kW/an est nul pour des sites tertiaires des secteurs étudiés quelle que soit la taille des sites.

A des niveaux de rémunération de l'ordre de 60€/kW/an, certains gisements d'effacement deviennent économiquement accessibles. Il s'agit des gisements d'effacement dans les sites du grand commerce alimentaire de grande taille (les grands hypermarchés) et les grands entrepôts frigorifiques. Ces gisements accessibles sont estimés entre 0 et 350 MW, avec un scénario de référence à ~200 MW.

Les gisements additionnels accessibles à des rémunérations entre 60 et 100€/kW/an sont situés au niveau de grands sites de bureaux, grands data centers et hypermarchés de tailles moyennes. A des niveaux de rémunération de l'ordre de 100€/kW/an, le gisement économiquement accessible est estimé entre 0,2 et 1 GW avec un scénario de référence à 0,6 GW.

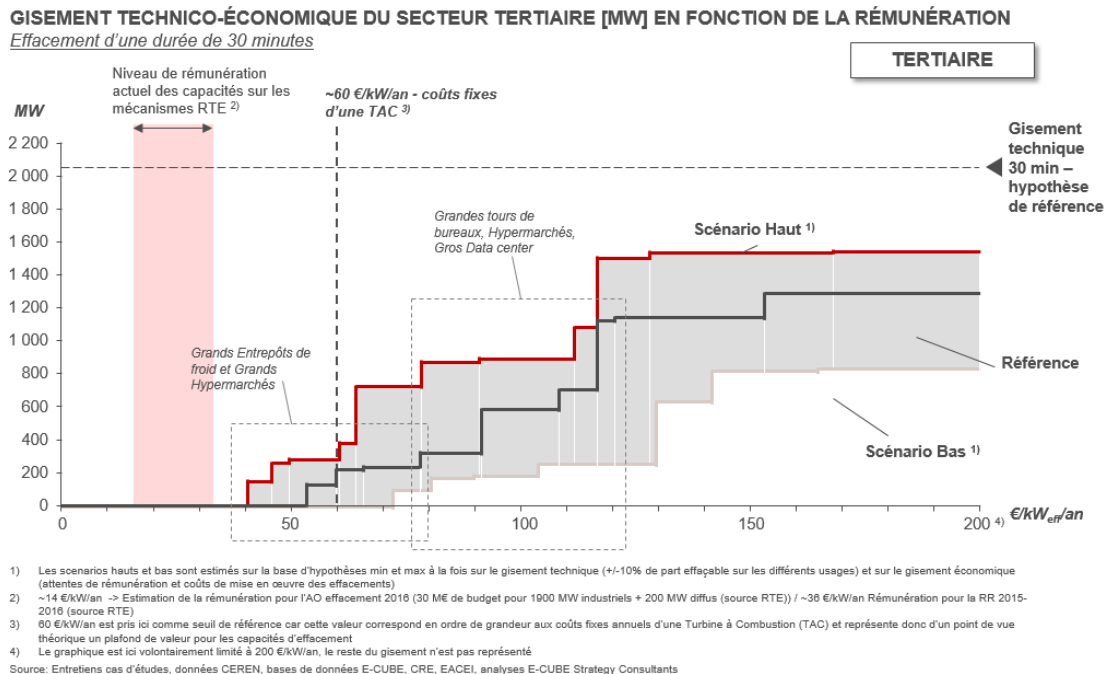


Figure 92 : Evolution du gisement technico-économique tertiaire par rapport à la rémunération capacitaire de l'effacement

Les estimations des gisements technico-économiques pour des effacements de 30 minutes ont été présentées ci-dessus (voir Figure 92) et sont fondées sur les estimations de gisement technique pour une durée de 30 minutes. La même méthodologie est adoptée pour estimer les gisements technico-économiques pour des durées d'activation d'effacement plus longues. Comme présenté en partie 4.2.3 (Gisement technique pour les secteurs tertiaires étudiés), le gisement technique décroît avec l'allongement de la durée d'activation afin de prendre en

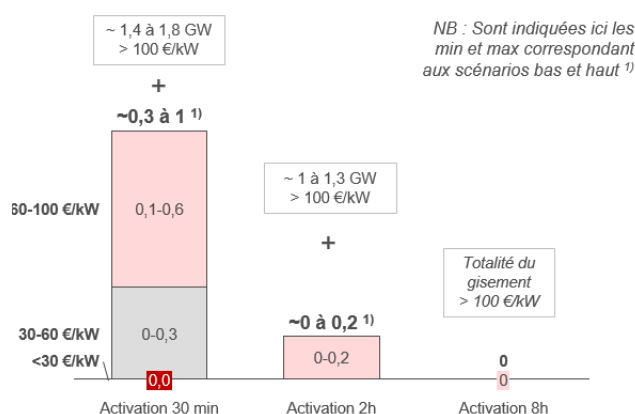
compte des durées d'activation consécutive d'effacement sur un usage qui peuvent être limitées et des effets reports potentiels sur ces usages. Le gisement technique à la maille nationale décroît avec l'allongement de la durée d'activation, il en est de même pour le gisement technique exploitable au niveau d'un site. A la maille d'un site, l'attente de rémunération ou le coût de mise en œuvre d'effacement restant le même, les niveaux d'attentes de rémunération par kW_{effaçable} augmentent. Ainsi pour un même niveau de rémunération de l'effacement, le gisement technico-économique pour une activation 2h sera inférieur au gisement technico-économique pour une activation de 30 minutes.

Les estimations de gisements technico-économiques (voir Figure 93) pour des durées plus longues d'effacement conduisent à des gisements :

- **Entre 0 et 200MW pour des effacements de l'ordre de 2h d'activation**
- **De 0 MW pour des effacements de l'ordre de 8h d'activation**

Il apparaît donc que les **effacements de consommation dans les secteurs analysés du tertiaire** (grand commerce alimentaire, entrepôts frigorifiques, traitement et distribution de l'eau, bureaux et data centers) sont des effacements **plus adaptés à des effacements de courte durée**, les gisements (qu'ils soient techniques ou technico-économiques) décroissent de façon importante avec l'allongement de la durée d'activation.

Gisements technico-économiques¹⁾ du secteur tertiaire [GW] par tranche de rémunération en fonction de la durée d'activation



¹⁾ Les scénarios hauts et bas sont estimés sur la base d'hypothèses min et max à la fois sur le gisement technique (+/-10% de part effaçable sur les différents usages) et sur le gisement économique (attentes de rémunération et coûts de mise en œuvre des effacements)

Source: Entretiens cas d'études, données CEREN, estimations E-CUBE, CRE, EACEI, analyses E-CUBE Strategy Consultants

- Le gisement économique accessible à des rémunérations actuelles (réserves tertiaires entre 0 et 30 €/kW_{eff}/an) est nul dans les secteurs du tertiaire
 - Les appels d'offre effacement sont en 2015 à ~15-20€/kW/an et la réserve rapide à ~36€/kW/an
- Les usages effaçables dans le secteur tertiaire sont plus adaptés à des effacements courts (30 min voire 2h)
 - Certains usages effaçables du secteur tertiaire pourraient être valorisés sur des mécanismes activables sur de courtes durées et nécessitant des réactivités rapides comme les services systèmes qui sont aujourd'hui plus rémunérés (~160€/kW/an en 2015)

Figure 93 : Gisement technico-économique tertiaire par tranche de rémunération en fonction de la durée d'activation

4.4. Evolution des gisements techniques et technico-économiques d'effacement à horizon 2035

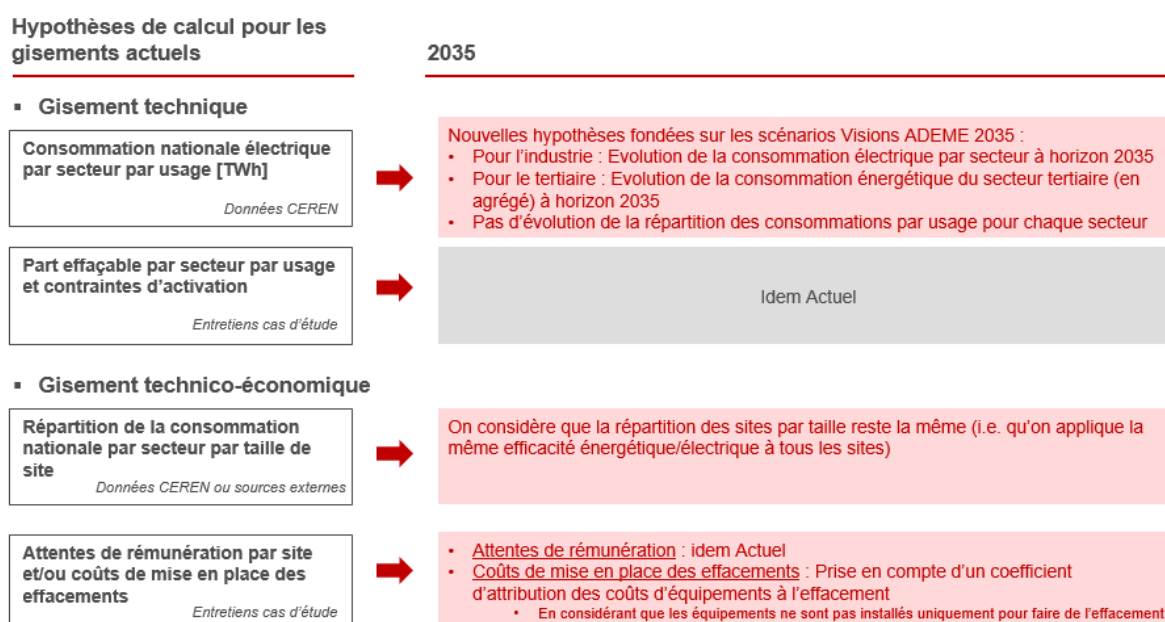
4.4.1. Scénarios de référence

Les estimations de gisements d'effacement à horizon 2035 sont fondées sur les visions prospectives de l'ADEME à l'horizon 2035.

Ces scénarios tiennent compte de l'évolution de l'activité des secteurs ainsi que des efforts d'efficacité énergétique.

Par ailleurs, les estimations de parts effaçables, **répartition de la consommation par taille de site, attentes de rémunérations par site et coûts de l'électricité, restent invariantes** par rapport aux estimations de gisements à horizon actuel. Les hypothèses de coûts de mise en place des effacements évoluent à horizon 2035 (voir 4.4.3).

EVOLUTION DES HYPOTHÈSES D'ESTIMATION DES GISEMENTS À HORIZON 2035



4.4.2. Evolution des gisements techniques entre aujourd'hui et l'horizon 2035

4.4.2.1. Evolution dans l'industrie

Le gisement est basé sur les visions prospectives de l'ADEME à l'horizon 2035 qui conduisent à une consommation électrique dans l'industrie de 92,7 TWh, en baisse de 21% par rapport à la consommation en 2013.

L'évolution de la consommation électrique varie fortement d'un secteur à l'autre, elle va d'une baisse de presque 50% dans l'agro-alimentaire à une augmentation de 18% dans le papier.

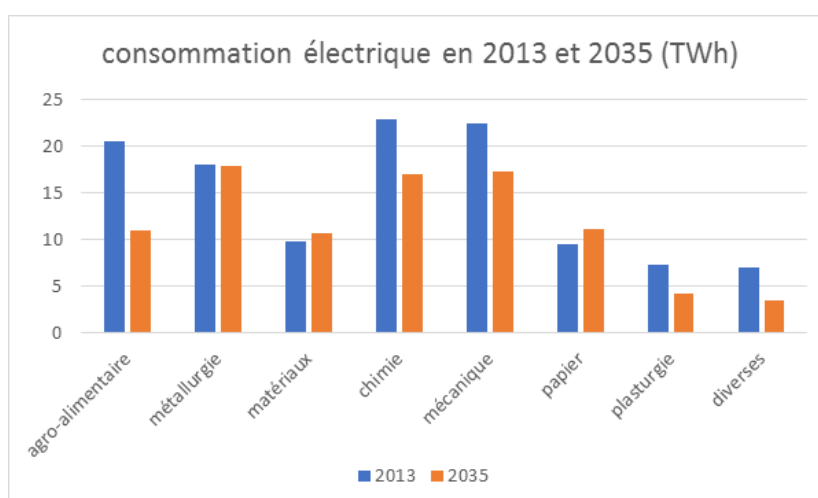


Figure 94 : Evolution des gisements techniques industriels entre aujourd'hui et 2035

Les mêmes hypothèses que pour l'estimation du gisement technique actuel, c'est-à-dire les mêmes parts de puissance effaçable par secteur x usage sont appliquées, et la répartition de la consommation électrique par usage pour chaque secteur reste inchangée.

Le gisement technique est ainsi estimé à 5 GW pour une durée d'effacement d'une demi-heure, le gisement technique pour une durée d'effacement de 2 h est estimé à 4,6 GW et le gisement technique pour une durée d'effacement de 8 h est estimé à 4 GW.

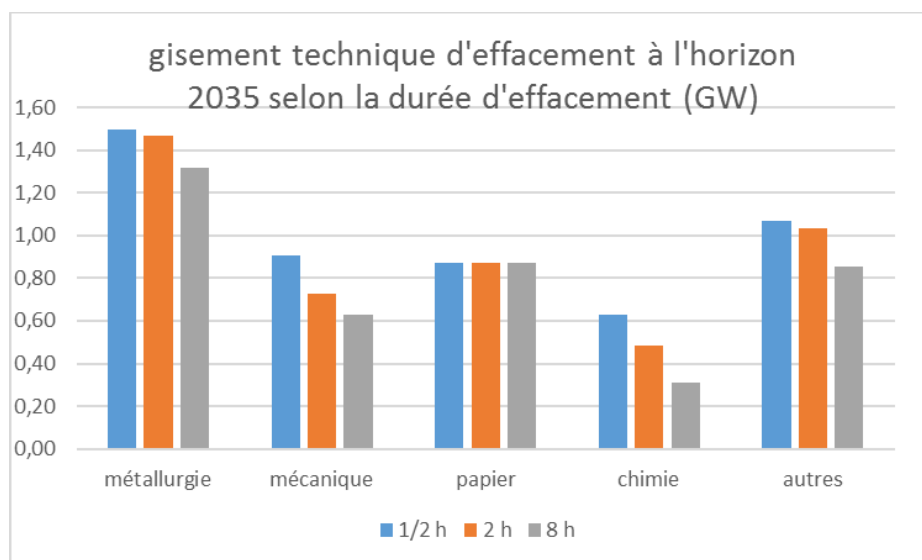


Figure 95 : Gisements techniques à horizon 2035 en fonction de la durée d'effacement

De même, le gisement d'effacement technico-économique à l'horizon 2035 est estimé à partir des hypothèses supplémentaires suivantes :

- pour chacun des secteurs d'activité, la répartition de la consommation par tranche de puissance souscrite reste inchangée
- par tranche de puissance souscrite, la consommation des sites ne varie pas (c'est le nombre de sites qui évolue)
- les prix de l'électricité par tranche de puissance souscrite ne varient pas.

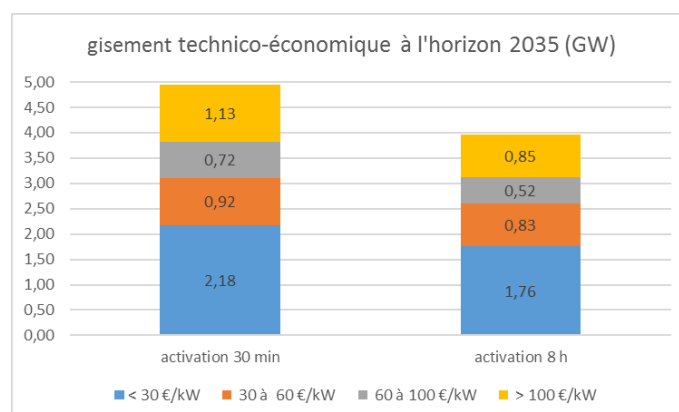


Figure 96 : Gisement technico-économique industriel à horizon 2035

Pour une attente de rémunération de 30 €/kW, le gisement technico-économique de l'effacement est de 2,2 GW pour une durée d'effacement d'une demi-heure et de 1,8 GW pour une durée d'effacement de 8 h.

Pour une attente de rémunération de 60 €/kW, le gisement technico-économique de l'effacement est de 3,1 GW pour une durée d'effacement d'une demi-heure et de 2,6 GW pour une durée d'effacement de 8 h.

4.4.2.2. Evolution dans le tertiaire

Les estimations de gisements techniques et technico-économiques à horizon 2035 sont fondées sur une évolution de la consommation électrique des secteurs analysés. Cette évolution est, pour la plupart des secteurs (exception faite du secteur des data centers), celle des consommations énergétiques du secteur tertiaire telles qu'estimées dans les scénarios prospectifs réalisés par l'ADEME ; ces scénarios tiennent compte à la fois d'une évolution de l'activité des secteurs du tertiaire et des efforts d'efficacité énergétique réalisés à horizon 2035. Sur la base des scénarios visions prospective 2035 ADEME, la consommation énergétique du secteur tertiaire de - 22% entre 2015 et 2035 et cette évolution de la consommation énergétique est extrapolée à l'évolution de la consommation électrique. Pour la plupart des secteurs, les autres hypothèses de calcul restent inchangées à horizon 2035.

Pour le secteur des data centers, compte tenu de la forte croissance des flux de données appelées sur les data centers (~25% par an selon Cisco), une croissance est à envisager à horizon 2035. Pour ce qui concerne la croissance de la consommation électrique de ce secteur, les efforts d'efficacité énergétique sur les data centers auront un impact qui compensera le développement des infrastructures. Ainsi, une hypothèse de croissance de la consommation électrique annuelle de 3%⁴¹ est prise, tenant compte du développement à venir des data centers en France. Les autres hypothèses d'estimation des gisements technique et technico-économiques restent inchangées par rapport aux hypothèses actuelles.

Ainsi, à horizon 2035, les gisements techniques dans le secteur tertiaire décroissent de ~20% (de ~2,5 GW d'effacements par modulation de process à ~2GW en 2035)

⁴¹ Entre 2012 et 2013 par exemple, le « Census Report – Global Data Center Power » publié par DCD-intelligence observe une augmentation de la consommation en France de 4,5 %/an (~6% en moyenne en Europe). En Allemagne, le Ministère de l'Économie et de l'Énergie allemand (BMWi) estime une projection à horizon 2025 de la consommation électrique des data centers fondée sur une croissance annuelle historique de +3% de la consommation entre 2010 et 2015

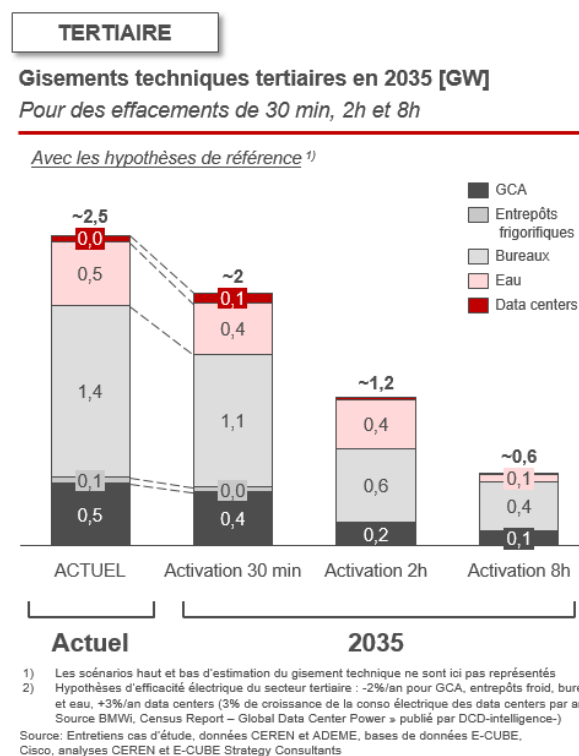


Figure 97 : Evolution à horizon 2035 du gisement technique d'effacement dans le tertiaire

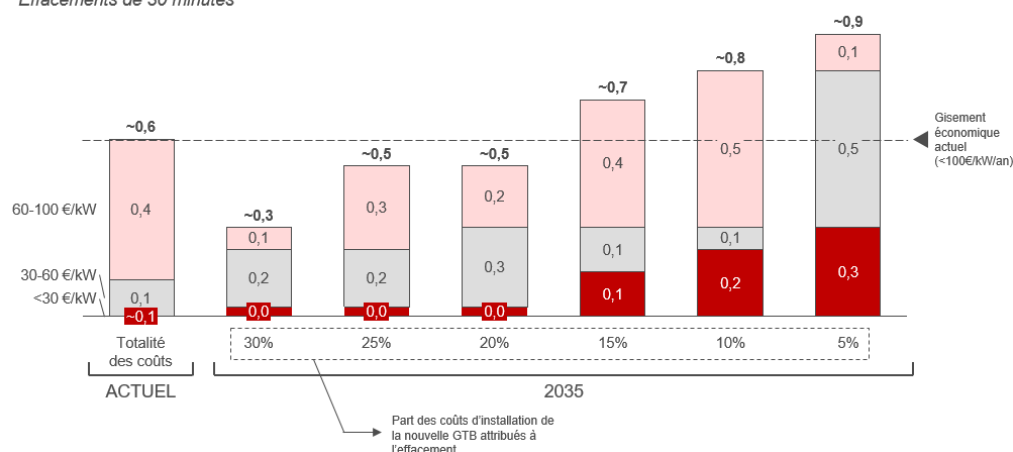
Concernant le gisement technico-économique, il est estimé sur la base des attentes de rémunération qui restent inchangées pour les secteurs de l'eau et des data centers et des hypothèses de coûts des GTB pour les secteurs du grand commerce alimentaire, des entrepôts frigorifiques et des bureaux (voir 4.4.3).

Le gisement technico-économique dans le secteur tertiaire à horizon 2035 dépendra de la part des coûts des équipements (GTB) qui est attribuée aux effacements, c'est-à-dire une mutualisation des coûts pour les investissements dans une GTB qui aura pour usage premier la réalisation d'efficacité énergétique (voir 4.4.3).

Ainsi, le gisement technico-économique pourrait, à horizon 2035, être de l'ordre de :

- 0 à ~300 MW pour des rémunérations de l'effacement de ~30€/kW/an
- ~200 à ~800MW pour des rémunérations de l'effacement de ~60€/kW/an

ESTIMATIONS DES GISEMENTS TECHNO-ÉCONOMIQUES¹⁾²⁾ EN 2035 DU SECTEUR TERTIAIRE [GW] PAR
TRANCHE DE RÉMUNÉRATION
Effacements de 30 minutes



1) Les incertitudes sont prises à la fois sur le gisement technique (+/-10% de part effaçable sur les différents usages) et sur le gisement technique (attentes de rémunération et coûts de mise en œuvre des effacements)
2) Hypothèses que les attentes de rémunération des consommateurs restent inchangées (data centers et eau), et que les coûts de mise en œuvre des effacements évoluent comme précédemment expliqué (GCA, entrepôts frigorifiques et bureaux)
Source: Entretiens cas d'études, données CEREN, estimations E-CUBE, CRE, ADEME, analyses E-CUBE Strategy Consultants

Figure 98 : Evolution probable du gisement technico-économique dans le tertiaire à horizon 2035

4.4.3. Présentation du cas évolution des équipements de pilotage type GTB vers des GTB « smart grid ready »

A horizon 2035, les technologies de pilotage des consommations des équipements, et notamment dans les secteurs tertiaires du grand commerce alimentaire, des entrepôts frigorifiques et des bureaux, sont amenées à évoluer. A l'heure actuelle, pour réaliser des effacements il est nécessaire de mettre à jour ou installer une nouvelle GTB afin qu'elle permette de réaliser des effacements. A horizon 2035, il est raisonnable de penser que les GTB qui auront alors été installées (en remplacement de GTB existantes) seront toutes capables de piloter des effacements.

Ainsi, les **coûts de mise en place des effacements évoluent** entre 2016 et l'horizon 2035. A l'heure actuelle, la totalité des coûts des GTB (ou de leur mise à jour) est prise en compte comme un coût de développement d'effacement car, les GTB existantes installées n'étant pas en mesure de réaliser des effacements, la mise en place d'effacements nécessite de nouveaux investissements dans ces équipements de pilotage. En revanche, à horizon 2035, il est estimé que, quelle que soit la taille du site, les GTB seront changées dans un but non directement lié à l'effacement. Leur premier objectif sera en effet l'efficacité énergétique et l'optimisation de la facture mais on peut faire l'hypothèse que ces équipements installés seront alors « *smart grid ready* », c'est-à-dire qu'ils permettront de réaliser des effacements de consommation.

Ainsi, **seule une partie des coûts de ces nouveaux équipements pourra être affectée à l'effacement** et dans le cadre de l'estimation de gisement potentiel, cette part des coûts attribuée à l'effacement fait l'objet d'une analyse de sensibilité (la variable « part des CAPEX attribuée à l'effacement » variant entre 5 et 30%). Cette hypothèse permet d'estimer les coûts de développement des effacements sur ces secteurs par site et par an à horizon 2035.

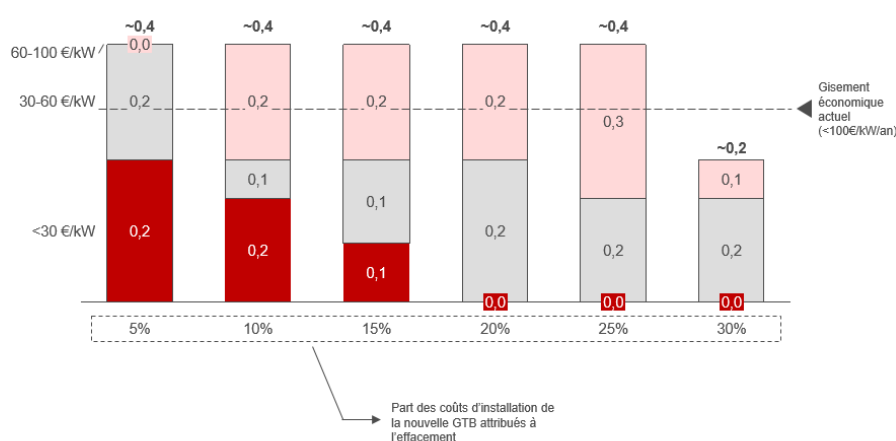
Illustration : Grand commerce alimentaire

Ainsi, pour prendre l'exemple du secteur du grand commerce alimentaire, le gisement accessible économiquement à l'heure actuelle est estimé comme nul (au vu des rémunérations actuelles des mécanismes sur lesquels sont valorisés des effacements en France, de ~30€/kW/an). A horizon 2035, compte tenu de la

mutualisation des coûts des équipements de pilotage (GTB) avec les activités d'efficacité énergétique, ce gisement pourrait augmenter (à un niveau de rémunération de l'effacement inchangé soit ~30€/kW/an).

Les gisements accessibles pour différents niveaux de rémunération sont en fonction de la part du coût des équipements de GTB attribuable aux effacements : plus elle est faible, plus les gisements seront accessibles à des niveaux de rémunération faibles. Ainsi, le gisement accessible à moins de 30€/kW/an est estimé entre 0 et 0,2 GW à horizon 2035, en dessous de 60€/kW/an entre 0,2 et 0,4GW à horizon 2035. (Voir ci-dessous)

ESTIMATIONS DES GISEMENTS TECHNICO-ÉCONOMIQUES¹⁾²⁾ EN 2035 DU SECTEUR GCA [GW] PAR TRANCHE DE RÉMUNÉRATION
Effacements de 30 minutes



1) Les incertitudes sont prises à la fois sur le gisement technique (+/-10% de part éligible sur les différents usages) et sur le gisement technique (attentes de rémunération et coûts de mise en oeuvre d'effacements)
2) Hypothèses que les attentes de rémunération des consommateurs restent inchangées (data centers et eau), et que les coûts de mise en oeuvre des effacements évoluent comme précédemment explicités (GCA, entrepôts frigorifiques et bureaux)
Source: Entretiens cas d'études, données Ceren, estimations E-CUBE, CRE, ADEME, analyses E-CUBE Strategy Consultants

5. Analyse des barrières au développement des effacements de consommation

L'analyse sectorielle du potentiel de développement de capacités d'effacement par modulation de *process* ou usages (c'est-à-dire sans autoproduction locale) a permis d'identifier, au sein de chaque secteur analysé, des contraintes sectorielles spécifiques. Elles peuvent, par exemple, être liées aux contraintes « sanitaires » et « commerciales » (dans la grande distribution) ou à la complexité et à la spécificité de la chaîne de production des différents secteurs industriels étudiés (existence d'un stockage intermédiaire par exemple). Ces barrières (ou contraintes) au développement de capacités d'effacement sont présentées dans chacune des analyses sectorielles (voir Partie 4.1 Détail des gisements et caractéristiques techniques des capacités d'effacement par secteur).

Au-delà de ces freins spécifiques secteur par secteur, quatre principaux types de « freins » (ou « barrières ») au développement de capacités additionnelles d'effacement de consommation électrique par modulation de *process* peuvent être distingués : **les freins technologiques, réglementaires, économiques et organisationnels** (ces deux derniers étant liés : contrainte organisationnelle jugée forte en regard d'un potentiel de rémunération).

Les échanges avec les différents acteurs du marché de l'électricité et du développement des effacements de consommation électrique en France (consommateurs, industriels, agrégateurs, ...) permettent de tirer les conclusions suivantes :

- **Les barrières « technologiques » à la mise en place de capacités d'effacement de consommation sont aujourd'hui relativement faibles** : les outils « technologiques » (équipements/instrumentations et logiciels/algorithmes d'optimisation et de contrôle) permettant la mise en place de capacités d'effacement (et plus généralement de flexibilité) existent aujourd'hui et peuvent être implémentés sur

la grande majorité des *usages* modulables, lorsque l'utilisation des capacités d'effacement nécessite un investissement et une instrumentation des équipements consommateurs (typiquement pour l'utilisation des capacités d'effacements pour des besoins d'équilibrage court terme et les services système). Pour certaines applications permettant un préavis important (plusieurs heures, voire J-1), une instrumentation des équipements consommateurs n'est d'ailleurs parfois pas nécessaire. Un des leviers d'amélioration (cf Paragraphe 5.2) peut néanmoins résider dans l'amélioration de la « flexibilité » de certains *process* (électrolyse par exemple) c'est-à-dire la capacité à fonctionner à des régimes non nominaux (en sous régime) pour permettre une modulation du *process* de production plutôt qu'un arrêt complet pouvant être plus contraignant pour les industriels.

- **De même, les barrières « réglementaires »** (liées au *design* des marchés et aux aspects « techniques » des règles régissant la participation des effacements aux marchés) **sont aujourd'hui relativement faibles. Si certains « freins » sont mis en avant par les opérateurs d'effacement et les industriels, l'analyse de benchmark réalisée** (cf chapitre 2.3 Benchmark des mécanismes de valorisation à l'international : Royaume-Uni, Japon et Etats-Unis (PJM et CAISO)) **montre que le cadre réglementaire développé en France ces dernières années autour des effacements de consommation est aujourd'hui particulièrement avancé et favorable au développement des capacités d'effacement** (ouverture progressive de l'ensemble des marchés (ajustement, énergie (via NEBEF), services systèmes) aux capacités d'effacement ; mise en place d'un marché de capacités non discriminatoire entre capacités d'effacement et de production ; appel d'offres dédié aux effacements) ; les freins réglementaires « résiduels » les plus fréquemment cités sont les aspects « techniques » liés aux règles de « **contrôle du réalisé** » sur les différents mécanismes⁴², la prise en compte et la possibilité de valorisation du **report de consommation** ou encore la participation aux services systèmes avec des produits dissymétriques⁴³. Ces éléments font cependant aujourd'hui l'objet de travaux d'évolution continus de la part du gestionnaire de réseau (**RTE**) et la commission de régulation de l'énergie (**CRE**), en concertation avec les acteurs industriels et agrégateurs de l'effacement, et les contraintes afférentes devraient être réduites à moyen terme. Au-delà de ces aspects techniques, un des freins « réglementaire » mentionné par les acteurs interrogés réside aussi dans **un manque de visibilité sur la pérennité et les évolutions attendues des différents mécanismes de valorisation des effacements existants, ce qui peut limiter les industriels dans leurs décisions d'investir pour optimiser leur potentiel d'effacement**. Ce manque de visibilité peut néanmoins s'expliquer en partie par un cadre réglementaire sur les effacements encore relativement récent, en construction et ayant donc été « naturellement » en constante évolution au cours de ces dernières années.
- **Le principal « frein » au développement de capacités additionnelles d'effacement par modulation de process est aujourd'hui économique et réside dans la « faible » valeur et rémunération accessible à l'heure actuelle aux effacements en regard des coûts et des contraintes** ⁴⁴**(humains et financiers) de mise en œuvre** (en particulier pour les sites « diffus » représentant des puissances unitaires faibles –

⁴² Hétérogénéité des règles de contrôle du réalisé entre les différents mécanismes (NEBEF, MA) ; manque de « souplesse » sur les règles existantes / manque de diversité dans les règles existantes (ie règles existantes pouvant être, selon certains acteurs, mal adaptées à certains types d'effacement)

⁴³ Entité proposant une capacité d'ajustement uniquement à la hausse ou uniquement à la baisse.

⁴⁴ Coûts pouvant inclure des coûts d'équipement, de formation, d'adaptation des process et également des pertes annexes (par exemple, les industriels ayant une installation de cogénération sous obligation d'achat devront continuer à produire de l'électricité dans des conditions économiques dégradées, la vapeur coproduite ne pouvant pas être valorisée pendant la durée de l'effacement et celle de la remise en service de leur ligne utilisatrice de vapeur)

tertiaire ou petite industrie) **et des attentes de rentabilité des industriels** (exigeant le plus souvent un retour sur investissement très court).

En effet, la valeur des effacements de consommation se présente sous deux principaux aspects : la **valeur « capacitaire »** qu'ils apportent au système électrique (via des capacités disponibles pour gérer les pointes de consommation, les déséquilibres court-terme du réseau, les contraintes réseau...) et la **valeur de « flexibilité »** liée à l'optimisation de l'équilibre offre/demande qu'ils peuvent apporter (via une augmentation de l'élasticité de la demande au prix) en se substituant à de la production.

Le contexte actuel de « surcapacité » du secteur électrique vécu en Europe depuis quelques années ainsi que la baisse des prix des combustibles (charbon, gaz, fioul) a fortement diminué les valeurs que peut apporter l'effacement de consommation au système électrique et donc sa rémunération. Ainsi, la valeur de capacité (lorsqu'elle est monétisable) est aujourd'hui relativement faible⁴⁵ et la baisse des prix sur les marchés de gros (liée à la baisse des prix des commodités et au contexte « surcapacitaire ») a fortement diminué la volatilité des prix (et notamment les écarts de prix entre périodes de pointes de consommation et périodes « creuses » (*spreads*)) diminuant donc la valeur de flexibilité/ d'optimisation apportée par les effacements de consommation.

Ainsi, les capacités d'effacement aujourd'hui développées correspondent naturellement aux capacités les plus compétitives d'un point de vue économique, les plus accessibles et facilement mises en œuvre (*process* modulables des grands acteurs industriels électro-intensifs ayant des consommations unitaires importantes et concentrées sur un nombre de sites restreint). Cependant, le gisement additionnel de capacité d'effacement existant fait aujourd'hui face à un problème de rentabilité, compte tenu de la valeur accessible en regard des coûts et contraintes de mise en œuvre et des attentes de rentabilité exigeantes des industriels.

Ce contexte pourrait néanmoins évoluer à moyen terme en fonction de l'évolution des capacités de production (résorption des surcapacités, accroissement de la production variable) et du niveau et profil de la consommation sur le système électrique.

- **Enfin, en « miroir » du frein économique, le développement de capacités additionnelles d'effacement via modulation de *process* fait aussi encore aujourd'hui face à des barrières « organisationnelles » ou culturelles fortes au sein d'une majorité d'entreprises ou d'industries**, notamment liées à leur réticence à la modification du fonctionnement de leurs outils de production, à une culture industrielle qui considère tout arrêt d'une ligne de production comme un événement malheureux et parfois, pour certains secteurs industriels ou tertiaires, leur simple manque de connaissance du sujet effacement.

En effet, le développement de capacités d'effacement chez des industriels nécessite le plus souvent des efforts de « conviction » significatifs de la part des opérateurs d'effacement en particulier dans les secteurs non électro-intensifs. L'outil de production et son fonctionnement ainsi que la continuité de la production et la réalisation du carnet de commande sont le plus souvent vus comme des priorités ne pouvant pas être remises en cause ou modifiées, même en cas de rémunération de la flexibilité. Par ailleurs, la mise en œuvre d'effacements, au-delà des modifications d'organisation parfois nécessaires et des coûts afférents (formation d'opérateurs, décalage des heures de travail, modification des procédures, ...), engendre également des risques sur l'outil de production lui-même pouvant être

⁴⁵ A l'exception de certains marchés comme les réserves primaires ou secondaires, répondant à des besoins d'équilibrage court-terme spécifiques, sur lesquelles la valeur accessible est élevée (> 100 €/kW/an), mais dont la taille de marché est très limitée

importants ou tout du moins perçus comme importants par les industriels (risque de défaut au redémarrage, casse, production de polluants, pertes imprévues de production).

Il est d'ailleurs important et nécessaire de convaincre les opérateurs des sites que l'effacement présente de l'intérêt de l'entreprise, il y a un coût social important.

D'autre part, les demandes d'effacement se produisent souvent le matin ou le soir, à peu près pendant les heures de changements d'équipes pour les sites fonctionnant en 3x8 h, ce qui occasionne des difficultés supplémentaires.

Dans le cas de l'exemple de l'électrolyse du chlore, l'effacement qui est pratiqué en réduisant l'intensité du courant dans les cellules d'électrolyse peut provoquer des altérations qui se traduisent par une moindre qualité du chlore produit.

Dans le cas de l'arrêt de lignes d'extrusion-soufflage en plasturgie, la remise en route des lignes dure quelques heures et peut entraîner un risque de rebuts non recyclables.

Au-delà de freins organisationnels « techniques » spécifiques à chaque industriel (lié à sa chaîne de production), un des freins repose aussi sur la multiplicité des interlocuteurs et des parties prenantes côté client. Cette multiplicité des interlocuteurs peut rendre difficile l'acquisition de nouveaux clients pour les opérateurs d'effacement et donc le développement de nouvelles capacités ainsi que la prise en compte des demandes et la compréhension de celles-ci par l'ensemble des acteurs des entreprises concernées, et ce dans différents secteurs :

- **Dans le secteur du tertiaire de « bureaux »** : les propriétaires des locaux, locataires et gestionnaires d'actifs sont souvent distincts et les parties prenantes supportant les coûts d'investissement dans les équipements sont souvent différentes de celles touchant les bénéfices de l'effacement, elles-mêmes différentes de celles pilotant la consommation énergétique du bâtiment ou subissant les contraintes liées à la mise en œuvre des effacements. Cette multiplicité des acteurs complexifie fortement la mise en place de capacités d'effacement pour un opérateur d'effacement.
- **Dans le secteur public** (Ministères, Hôpitaux, ...) et de manière plus générale pour l'ensemble des infrastructures consommatrices exploitées dans le cadre d'un contrat de concession, un des freins au développement peut parfois provenir de la problématique d'affectation des revenus issus de la valorisation des effacements (exploitants vs entité concédante). Par ailleurs, les entités publiques étant soumises au code des marchés publics, l'obligation de réaliser une démarche d'appel d'offres auprès d'opérateurs d'effacement nécessitant l'élaboration d'un cahier des charges spécifique peut parfois représenter une barrière importante pour ce type d'acteurs.
- **Dans le secteur de l'eau** (traitement et distribution de l'eau) : les relations client se font au niveau des maisons mères avec des accords de déploiement ; cependant, la mise en place des équipements et des processus organisationnels liés à la mise en œuvre des effacements se réalise à la maille locale, avec les exploitants des réseaux de distribution ou des centrales de traitement des eaux, et peut donc être plus compliquée avec des problématiques au « cas par cas » malgré les engagements cadres.

5.1. L'enjeu de fiabilité des capacités d'effacement

Si elle n'est pas considérée comme un frein « direct » au développement des effacements, la fiabilité des capacités d'effacement est néanmoins un enjeu important à court terme pour garantir la pérennité de la filière au sein du système électrique à plus long-terme.

En 2016, certaines capacités d'effacement valorisées sur l'Appel d'Offre Effacement géré par RTE ont connu des taux de défaillance (*Capacité d'effacement réalisée lors des appels vs. Capacité « Vendue » dans le cadre de l'AO*) significatifs (> 50%), complexifiant l'équilibrage du réseau (voire mettant en danger l'équilibrage lors d'indisponibilités non communiquées en amont au gestionnaire de réseau).

Pour pallier cette problématique, RTE a proposé aux opérateurs d'effacement et a mis en œuvre (dans le cadre de l'Appel d'Offres Effacement 2017) un « **paquet fiabilité** » destiné à « *assurer la bonne insertion de la filière « effacements » dans le système électrique* » en intégrant des exigences de fiabilité renforcées comprenant notamment des tests aléatoires, des contrôles systématiques de disponibilité et la publication d'indicateurs individuels de fiabilité. Dès l'hiver 2017, il semblerait que ces mesures aient permis d'augmenter la fiabilité des effacements (un taux de défaillance de 65% en 2016 abaissé à 10% en janvier 2017).

Comme pour toute filière technologique, la pérennité à long terme de la filière effacement passera nécessairement par l'amélioration de ses performances / sa fiabilité et sa capacité à garantir le niveau de service attendu des capacités aujourd'hui valorisées et soutenues par un cadre réglementaire favorable.

5.2. Identification de pistes d'actions possibles pour la levée des barrières au développement

S'il existe peu de leviers pouvant modifier la valeur économique des effacements pour le système électrique (hors subventions), différents leviers d'actions peuvent être envisagés pour stimuler le développement de capacités additionnelles d'effacement et permettre de lever ou atténuer certaines des barrières mentionnées précédemment.

Ci-dessous sont citées quelques pistes d'actions possibles (non exhaustives) résultant des analyses réalisées et des échanges avec les acteurs de la filière.

- **Intensifier la communication et la sensibilisation des consommateurs au sujet « effacement »**

Un des premiers freins au développement de capacités additionnelles d'effacement réside dans le manque de connaissance du sujet par un grand nombre de consommateurs industriels et tertiaires. En effet, si la majorité des industriels électro-intensifs valorisent déjà leurs capacités ou ont *a minima*, une bonne connaissance de leur potentiel et des mécanismes de valorisation existants, le niveau de connaissance du sujet « effacement » est nettement plus faible au sein des autres entreprises industrielles et tertiaires. La sensibilisation des consommateurs aux effacements de consommation (leur intérêt pour le système électrique, le potentiel de rémunération, les mécanismes de valorisation, ...) pourrait être intensifiée. A cet égard, les initiatives telles que le « guide technique » sur la flexibilité de

consommation électrique⁴⁶ réalisé par l'UIC (l'Union des Industries Chimiques) à destination de ses adhérents peuvent être prises en exemple.

En complément de ce type de communication, la sensibilisation et la montée en compétence des acteurs pourrait aussi passer par la promotion d'outil d'aide à la décision comme un « diagnostic effacement » dédié à l'estimation du potentiel de capacité d'effacement de *process* au sein d'une entreprise.

- **Favoriser, dans le secteur tertiaire en particulier, une démarche de mutualisation des investissements en incitant lors des rénovations ou nouvelles constructions à rendre les sites « *smart grid ready* »**

Dans le secteur tertiaire, les analyses économiques menées montrent que le niveau de rémunération des effacements est insuffisant pour justifier seul les investissements nécessaires à la mise en place de capacités d'effacement (instrumentation des sites en GTB ou mise à niveau des GTB existantes). La réduction des coûts de mise en œuvre pourrait néanmoins passer, à moyen terme, par une mutualisation des coûts avec les infrastructures techniques nécessaires pour d'autres services d'efficacité énergétique : c'est-à-dire plus concrètement faire en sorte que les infrastructures installées pour l'efficacité énergétique, lors de rénovations ou de constructions neuves, soient techniquement adaptées à la réalisation d'effacements (contrôle centralisé, protocoles de commandes adaptés, ...) cohérents avec les besoins du système électrique (→ incitation à rendre les bâtiments « *smart grid ready* »).

Cela implique notamment une standardisation des protocoles de communications, ce qui faciliterait le consentement à payer pour de telles installations.

- **Apporter plus de stabilité et de visibilité dans les règles / mécanismes de valorisation des effacements**

Comme mentionné au chapitre 5, certains acteurs industriels interrogés ont insisté sur deux verrous :

- Une modification continue du cadre de valorisation des effacements ces dernières années, non propice à l'augmentation des capacités (évolutions des règles de participation aux AO, pénalités, calcul du baseload, ...)
- Une visibilité faible sur la rémunération (AO annuels, pas de contrat plus long-terme) n'incitant pas à l'investissement (humain/organisationnel ou financier) dans le développement de capacités d'effacement

Ces évolutions fréquentes du cadre de valorisation s'expliquent néanmoins par un *market design* récent et non « mature » qui a donc subi des modifications « naturelles » ces dernières années, notamment pour permettre davantage d'intégration des effacements aux marchés, mais qui devrait se stabiliser à court/moyen terme.

- **Renforcer la collaboration en amont entre fabricants d'équipements et utilisateurs pour améliorer la flexibilité des équipements consommateurs d'électricité**

Le gisement technique est aussi limité dans certains secteurs par la capacité technique des équipements et des procédés à accepter un niveau de modulation de puissance important (ex : électrolyse dans la chimie). Un des leviers d'amélioration pourrait résider dans l'amélioration de la « flexibilité » de ces *process* (c'est-à-dire la capacité à fonctionner à des régimes non nominaux (en sous régime)) pour permettre une modulation du *process* de production plutôt qu'un arrêt complet pouvant être plus contraignant et plus risqué pour les industriels.

⁴⁶ «DT 117 – Flexibilité de consommation électrique (Effacement) » Novembre 2016 – Union des Industries Chimiques

Un travail en amont entre fabricants d'équipements et utilisateurs (consommateurs), en collaboration avec les acteurs du système électrique, pourrait permettre le développement d'équipements plus « flexibles ».

- **Élargir les possibilités de valorisation des effacements, en permettant notamment une valorisation des services que peuvent rendre les effacements à la maille locale pour les gestionnaires de réseaux de distribution (GRD)**

Le cadre réglementaire de valorisation des effacements à une maille nationale pour les besoins du gestionnaire du réseau de transport (RTE) a été largement développé et amélioré, donnant accès aux effacements à de nouvelles sources de rémunération. Néanmoins, au-delà de la valeur capacitaire que peut apporter l'effacement à la maille nationale, l'effacement peut aussi permettre une **optimisation des coûts d'exploitation du réseau à la maille locale, au niveau du réseau de distribution**, notamment en permettant le report (voire l'annulation) d'investissements liés au renforcement du réseau.

Si cette valeur s'adresse plutôt aux capacités diffuses (pour des consommateurs raccordées au réseau de distribution), aujourd'hui, **le cadre réglementaire et les mécanismes permettant la monétisation de cette valeur auprès des GRD n'existe pas encore en France (hors cadre d'expérimentation permis par la loi de transition énergétique – article 199), et sa mise en place pourrait constituer dans certaines zones une source de rémunération supplémentaire pour les effacements de consommation** incitant au développement de capacités additionnelles.

ANNEXES

Principales hypothèses de modélisation par secteur et par usage

Secteur	Filière/Usage	Part effaçable			Durée de l'effacement
		Référence	Minimum	Maximum	
Industrie					
Métallurgie	Acier électrique	75%	65%	85%	
Métallurgie	Ferro-alliages	75%	75%	95%	
Métallurgie	Aluminium	35%	30%	40%	
Métallurgie	Zinc	57%	57%	60%	
Métallurgie	Laminage	50%	40%	60%	
Métallurgie	Solde thermique	50%	35%	60%	
Métallurgie	Agglomération minéral de fer	50%	35%	60%	
Chimie	Silicium	75%	75%	95%	
Chimie	Gaz industriels	20%	15%	25%	
Chimie	Chlore	45%	40%	50%	
Chimie	Solde thermique	50%	40%	60%	
Chimie	Froid	80%	70%	100%	
Chimie	Broyage	80%	70%	90%	
Matériaux	Ciment (broyage)	90%	75%	100%	
Matériaux	Thermique	75%	60%	85%	
Verre	Boosting	100%	80%	100%	
Verre	Ligne de fabrication verre creux	100%	80%	100%	
Verre	Solde thermique	100%	80%	100%	
Mécanique	Thermique	60%	40%	70%	
Mécanique	Auxiliaires fours	50%	30%	60%	
Mécanique	Froid	80%	70%	100%	
Mécanique	Electrolyse	50%	35%	60%	
Papier	Fabrication pâte	100%	70%	100%	
Papier	Fabrication papier	100%	70%	100%	
Plasturgie caoutchouc	Thermique	100%	70%	100%	
Plasturgie caoutchouc	Auxiliaires dont froid refroidissement	80%	60%	90%	
Plasturgie caoutchouc	Froid clim process	60%	40%	80%	
Agro-alimentaire	Thermique	60%	50%	80%	
Agro-alimentaire	Froid chambres froides	100%	80%	100%	
Agro-alimentaire	Froid climatisation process	80%	60%	100%	
Diverses	Thermique	60%	50%	70%	
Diverses	Froid	80%	60%	100%	
Diverses	Broyage	80%	65%	90%	
Toutes industries	Chauffage locaux	50%	35%	65%	
Toutes industries	Eclairage	25%	15%	30%	
Tertiaire					
Entrepôts froid, GCA,					
Bureaux	Froid	50%	40%	60%	0,5
GCA, Bureaux	Chauffage	50%	40%	60%	1
GCA, Bureaux	Climatisation	50%	40%	60%	1
GCA, Bureaux	Eclairage	25%	15%	35%	n.a.
Data centers	Froid (data centers)	100%	90%	100%	0,25
Eau	Pompage (eau)	100%	90%	100%	2
Eau	Aération (eau)	100%	90%	100%	2



Table des figures

Figure 1 : Schéma illustratif des sources de déséquilibre et des outils d'équilibrage.....	11
Figure 2 : Typologie simplifiée des effacements de consommation	13
Figure 3 : Critères de caractérisation des effacements.....	13
Figure 4: Effacements disponibles pour l'hiver 2016-2017 - source RTE.....	15
Figure 5 : Acteurs du secteur de l'effacement interrogés.....	19
Figure 6 : Présentation des mécanismes de valorisation de l'effacement en France	21
Figure 7 : Valorisation des effacements en fonction des mécanismes	22
Figure 8 : Synthèse des mécanismes de gestion des déséquilibres à disposition de RTE.....	27
Figure 9: Localisation géographique des distributeurs au Royaume-Uni	33
Figure 10 - Capacities breakdown by type on STOR.....	36
Figure 11 - Evolution des prix sur STOR entre 2012 et 2016.....	37
Figure 12 : Schéma des régions électriques japonaises	41
Figure 13 : Revenus annuels générés par les effacements par marché [M\$]	45
Figure 14: Capacités confirmées pour l'année de livraison 2015/2016 par segment d'activité [Capacity market]	46
Figure 15 : Capacités confirmées pour l'année de livraison 2015/2016 par type d'effacement ou usage effacé [Capacity market]	46
Figure 16 : Participation à la Regulation par type d'effacement ou usage effacé en 2016	47
Figure 17: Participation des effacements aux BRA et ILR [Années de livraison : 2008 à 2019]	49
Figure 18 : Clearing prices des enchères initiales pour les années de livraison 2007/2008 à 2019/2020 par zone.....	49
Figure 19: Périmètre CAISO.....	50
Figure 20 : Comparaison des tarifs entre un Peak Day Event et un jour d'été sans Peak.....	53
Figure 21 : Synthèse des cadres réglementaires de valorisation des effacements dans les pays analysés	54
Figure 22 : Consommation électrique nationale des secteurs étudiés	57
Figure 23 : Liste des acteurs rencontrés.....	58
Figure 24 : Critères techniques clés d'un effacement	59
Figure 25 : Illustration de la méthodologie : estimation du gisement technique pour le grand commerce alimentaire (sur 3 durées d'activation)	61
Figure 26 : Schéma de synthèse de la méthodologie d'évaluation des gisements technique et technico-économique	63
Figure 27 : Prix de l'électricité en fonction de la puissance souscrite dans l'industrie [Insee 2014]	64
Figure 28 : Méthodologies d'estimation de la rémunération des effacements nécessaire.....	65
Figure 29 : Méthodologie d'extrapolation des estimations de gisements à horizon 2035.....	66
Figure 30 : Consommation électrique nationale du secteur de la métallurgie (CEREN, 2013).....	70
Figure 31 : Répartition de la consommation électrique du secteur : Sidérurgie vs. non ferreux	70
Figure 32 : Consommation des usages moteurs du secteur de la métallurgie	71
Figure 33 : Estimation du gisement technique dans la métallurgie (scénario médian).....	75
Figure 34 : Estimation du gisement technico-économique dans la métallurgie.....	76
Figure 35 : Consommation électrique de la chimie en 2013 (CEREN)	77
Figure 36 : Répartition de la consommation électrique de la chimie par secteur NCE	77
Figure 37 : Estimation du gisement technique dans la chimie.....	81
Figure 38 : Estimation du gisement technico-économique dans la chimie.....	82
Figure 39 : Consommation électrique du secteur mécanique (CEREN, 2013)	83

Figure 40 : Répartition de la consommation par sous-secteur	83
Figure 41 : Consommation électrique nationale du secteur matériaux non métalliques (CEREN, 2013)	88
Figure 42 : Répartition de la consommation électrique du secteur des matériaux par secteur NCE ...	88
Figure 43 : Estimation du gisement technique dans le secteur des matériaux	91
Figure 44 : Estimation du gisement technico-économique dans le secteur des matériaux	92
Figure 45 : Consommation électrique nationale de la plasturgie/caoutchouc (CEREN 2013)	93
Figure 46 : Répartition de la consommation électrique de la plasturgie/caoutchouc.....	93
Figure 47 : Estimation du gisement technique dans la plasturgie/caoutchouc	96
Figure 48 : Estimation du gisement technico-économique dans la plasturgie/caoutchouc	96
Figure 49 : Consommation électrique nationale du secteur du papier (CEREN 2013)	97
Figure 50 : Ratios de puissance effaçable dans l'industrie papetière	99
Figure 51 : Gisement technique t dans l'industrie papetière.....	100
Figure 52 : Estimations du gisement technico-économique dans l'industrie papetière.....	100
Figure 53 : Consommation électrique nationale du secteur agro-alimentaire (CEREN, 2013).....	101
Figure 54 : Répartition de la consommation électrique nationale de l'agro-alimentaire par secteur NCE (CEREN, 2013)	102
Figure 55 : Ratios de puissance effaçable IAA.....	104
Figure 56 : Estimations du gisement technique dans l'agro-alimentaire.....	104
Figure 57 : Estimations du gisement technico-économique dans l'agro-alimentaire.....	105
Figure 58 : Consommation électrique nationale "Industries diverses" (CEREN, 2013)	106
Figure 59 : Répartition par secteur NCE de la consommation électrique des industries diverses (CEREN 2013).....	106
Figure 60 : Ratios de puissances effaçables	108
Figure 61 : Estimation du gisement technique dans les industries diverses en fonction de la durée d'effacement	108
Figure 62 : Gisement technico-économique dans les industries diverses	109
Figure 63 : Consommation électrique d'un hypermarché chauffé à l'électricité.....	111
Figure 64 : Courbe de charge journalière d'un supermarché	112
Figure 65 : Estimation de gisements d'effacement dans le grand commerce alimentaire.....	117
Figure 66 : Consommation moyenne des ateliers de stockage de froid positif (Source: ADEME) en énergie primaire.....	117
Figure 67 : Courbe de charge d'un entrepôt de stockage de froid négatif sur une période d'effacement (Source : ENR-Pool 2014)	119
Figure 68 : Courbe de charge d'un entrepôt de froid positif sur une période d'effacement (Source : ENR-Pool 2014).....	120
Figure 69 : Estimation de gisements d'effacement dans les entrepôts de froid	122
Figure 70 : Consommation électrique du secteur des bureaux	123
Figure 71 : Estimation des gisements techniques et technico-économiques pour le secteur des Bureaux	127
Figure 72 : Schéma descriptif des activités de traitement et distribution des eaux (incluant de gauche à droite : une station de pompage, une usine de production d'eau potable avec un stockage en amont de l'usine, un stockage en aval de l'usine avant la distribution, et un réseau de distribution d'eau potable) – Source : CRE	128
Figure 73 : Schéma de fonctionnement d'une station théorique	129
Figure 74 : Répartition de la consommation énergétique d'une station d'épuration par usage [%] ..	129
Figure 75 : Estimation des gisements technique et technico-économique dans le secteur du traitement et distribution de l'eau.....	135

Figure 76: Modélisation de la consommation électrique d'un data center de 500m ² (Emerson Network Power)	137
Figure 77 : Utilisation journalière d'un data center et puissance appelée (Source : Emerson Network Power)	138
Figure 78 : [Data centers] Estimation des gisements technique et technico-économique actuels....	142
Figure 79 : Estimation de gisement technique dans l'industrie et le tertiaire en France	143
Figure 80 : Gisements techniques en fonction de la durée d'activation.....	144
Figure 81 : Gisement technique industriel par secteur et par usage	145
Figure 82 : Gisement technique industriel par usage (activation de 30 minutes)	146
Figure 83 : Consommation nationale électrique de l'industrie (CEREN, 2013).....	146
Figure 84 : Gisement technique dans l'industrie par durée d'activation	147
Figure 85 : Estimation du gisement technique tertiaire pour 30 minutes d'effacement	148
Figure 86 : Détails du gisement technique par usage et par secteur.....	149
Figure 87 : Gisements techniques dans le tertiaire estimés selon la durée d'activation.....	149
Figure 88 : Estimation du gisement technico-économique d'effacement	151
Figure 89 : Gisement technico-économique d'effacement industriel pour une durée de 30 minutes en fonction de la rémunération	153
Figure 90 : Gisement technico-économique industriel pour une durée d'effacement de 8 heures en fonction de la rémunération	155
Figure 91 : Comparaison des gisements technico-économiques industriels pour des activations de 30 min et 8h	155
Figure 92 : Evolution du gisement technico-économique tertiaire par rapport à la rémunération capacitaire de l'effacement.....	156
Figure 93 : Gisement technico-économique tertiaire par tranche de rémunération en fonction de la durée d'activation	157
Figure 94 : Evolution des gisements techniques industriels entre aujourd'hui et 2035.....	158
Figure 95 : Gisements techniques à horizon 2035 en fonction de la durée d'effacement	159
Figure 96 : Gisement technico-économique industriel à horizon 2035	159
Figure 97 : Evolution à horizon 2035 du gisement technique d'effacement dans le tertiaire.....	161
Figure 98 : Evolution probable du gisement technico-économique dans le tertiaire à horizon 2035	162

Lexique

Agrégateur : un agrégateur est l'intermédiaire entre des productions ou des consommations décentralisées d'une part et les marchés nationaux (énergie, capacité) d'autre part. Ce sont ces intermédiaires qui portent le risque d'équilibrage sur leur périmètre d'agrégation. Les écarts entre la production et la vente sont le principal poste de coût de ces acteurs.

Approches top down et bottom-up : Une approche ascendante (dite bottom-up) ou descendante (dite top-down) caractérise le principe général de fonctionnement d'une démarche procédurale. En première analyse, la distinction peut désigner le sens d'une démarche intellectuelle :

- Il peut s'agir d'une synthèse (ascendante, bottom-up) où l'on part du détail, du « bas », c'est-à-dire l'échelon le plus fin, pour consolider progressivement et opérer une synthèse.
- Il peut s'agir d'une analyse (descendante, top-down) où, partant de l'ensemble, on décompose en éléments toujours plus détaillés, pour déboucher sur une « mise à plat », une « dissection totale », un état des lieux de l'objet étudié

Autoproduction : Alimentation électrique d'un site par un système de production sur site (groupe électrogène, cogénération, système de production décentralisé) afin d'assurer une alimentation électrique du site (i) en continu (ou semi-continu), ou (ii) en cas de faille du réseau électrique, de jouer le rôle de complément ou relai à l'alimentation électrique réseau, ou (iii) de répondre à un besoin d'effacement ou autre besoin spécifique

Cascado-cyclicité : Le pilotage par cascado-cyclicité consiste à activer tour à tour différents équipements afin de générer une activation d'effacement sur une durée prolongée par rapport à l'activation d'un seul de ces équipements

Démonstrateur : Projet pilote destiné à démontrer la faisabilité technique ou technico-économique d'un système, comme l'effacement par exemple

Effacement : l'effacement de consommation consiste en « une réduction temporaire du niveau de consommation d'un site vu du réseau, en réponse à une sollicitation externe ». Cette réduction temporaire est réalisée par rapport à une consommation initialement prévue.

Effacement diffus : effacement qui fait appel à l'agrégation d'un grand nombre de capacités d'effacements éparées, en particulier sur des sites situés sur les réseaux de distribution, et qui nécessite en conséquence des modalités de valorisation technico-économiques spécifiques en ce que cette catégorie d'effacements soulève des problématiques opérationnelles propres. Cet effacement concerne à l'heure actuelle des consommations à usage thermique (radiateurs et ballons d'eau chaude électrique)

Effet report : Décalage dans le temps de la consommation non réalisée lors de l'effacement. Il est compris entre 0 et 100% de la consommation effacée sur une période d'activation et peut avoir lieu après l'activation ou être anticipé avant l'activation

Elasticité de la demande : Relation entre la variation relative de la demande et la variation relative du prix

Energie décarbonée : Une énergie « décarbonée » n'émet pas ou peu de dioxyde de carbone (CO₂). Dans une acception commune, toutes les énergies renouvelables ainsi que l'énergie nucléaire sont considérées comme décarbonées

Foisonnement : Mise en commun de points de consommation et/ou de production d'énergie, dont les courbes de charges individuelles de production ou de consommation peuvent être variables et sujettes à des aléas dans le temps.

Gisement technico-économique : ce gisement correspond à une estimation de la puissance valorisable en fonction de la rémunération accordée pour une puissance effaçable disponible. Cela permet finalement de répondre à la question : « quel gisement disponible pour quel niveau de rémunération ? »

Gisement technique : ce gisement correspond à une estimation du maximum de capacité techniquement effaçable sur les différents process effaçables à un instant t dans chaque secteur hors contraintes économiques (sans considération de rentabilité d'investissements nécessaires ou autres coûts de mise en œuvre)

Industrie électro-intensive : Le terme « électro-intensifs » désigne des entreprises dont l'activité nécessite une consommation importante d'électricité. En France, une entreprise est plus précisément considérée comme électro-intensive dès lors que sa consommation d'électricité est supérieure à 2,5 kWh par euro de valeur ajoutée (différence entre le chiffre d'affaires et les coûts intermédiaires).

Market design : Organisation d'un marché autour de ses institutions et de sa réglementation

Mécanisme de valorisation explicite ou implicite : Au sein de la filière effacement, on distingue ainsi souvent les effacements qualifiés communément d'« explicites » (c'est-à-dire en réponse à une demande explicite de réduction du niveau de consommation) sur sollicitation d'un des acteurs mentionnés ci-dessus, des effacements « tarifaires » (comme les capacités d'effacement correspondant aux anciennes offres tarifaires EJP ou Tempo) qualifiés communément d'effacements « implicites » car correspondant à une réduction du niveau de consommation d'un site en réponse à une augmentation temporaire du tarif de l'électricité facturé au consommateur.

Opérateur de système électrique : Acteur en charge de l'équilibre du système électrique sur son périmètre à tout instant (RTE en France, National Grid au Royaume-Uni...)

Opérateur d'effacement : Intermédiaire entre les consommateurs capables de réaliser des effacements et les différents marchés de valorisation de l'effacement. L'opérateur d'effacement est l'acteur en charge du pilotage des capacités d'effacement de ses clients (activation, communication, mesure) et de leur valorisation

Participation symétrique ou asymétrique à un mécanisme d'équilibrage : Participation symétrique : un acteur (producteur ou consommateur) participe de façon symétrique à un mécanisme s'il est capable de s'activer à la hausse comme à la baisse.

Participation asymétrique : un acteur (producteur ou consommateur) participe de façon symétrique à un mécanisme s'il est capable de s'activer uniquement à la hausse ou à la baisse.

Point d'injection et point de soutirage : un point d'injection est un raccordement au réseau où l'électricité est injectée dans le réseau (cas du raccordement d'une centrale). Un point de soutirage est un raccordement au réseau où l'électricité est soutirée du réseau (cas du raccordement d'un consommateur).

Pure player : Entreprise ayant démarré et exerçant dans un secteur d'activité unique.

Réserve primaire et secondaire : Réserves de capacités de production ou de consommation en vue d'assurer l'équilibre du système électrique à tout instant. La réserve primaire permet de contenir, en quelques secondes, les déviations de fréquence et la réserve secondaire permet de ramener la fréquence à son niveau nominal en quelques minutes

Réserve tertiaire : Réserve de capacités de production ou de consommation en vue d'assurer l'équilibre du système électrique à tout instant. La réserve tertiaire permet de régler des écarts de plus long terme (de dizaines de minutes à plusieurs heures), pour se substituer à la réserve secondaire si celle-ci est épuisée ou n'est pas suffisante pour faire face à un nouveau déséquilibre, mais aussi pour se substituer aux réserves primaire et secondaire ou anticiper un déséquilibre à venir.

Smart grid : Pilotage du système électrique flexible afin de faire face à l'intégration des énergies renouvelables variables et le développement de nouveaux usages tels que le véhicule électrique en intégrant des nouvelles technologies de l'information et de la communication aux réseaux pour les rendre plus communicants

Utility : Une utility désigne une entreprise privée ou publique qui fournit des services aux collectivités. Ces services peuvent être la production ou la distribution d'électricité, de gaz, ou d'eau.

Valeur capacitaire : Les capacités d'effacement participent lorsqu'elles sont disponibles à la réduction du besoin de capacité lors des pointes nationales de consommation électrique. C'est la valeur de capacité. Cette valeur est révélée et valorisée par le mécanisme de capacité

Virtual Power Plant : Centrale de production virtuelle agrégeant des capacités de production ou d'effacement décentralisées (micro-cogénérations, centrales photovoltaïques, petite hydro, éoliennes, effacement, stockage...) afin de créer une centrale de capacité supérieure optimisée et pilotée par un agrégateur

Sigles et acronymes

Sigle	Signification
AO	Appel d'Offres
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i> (investissements)
CRE	Commission de Régulation de l'Energie
EJP	Effacement Jours de Pointe
ENR	Energie renouvelable
GCA	Grand commerce alimentaire
GRD	Gestionnaire de Réseau de Distribution
GRT	Gestionnaire de Réseau de Transport
GTB	Gestion Technique du Bâtiment
GTC	Gestion Technique Centralisée
GW	Gigawatt (GWh gigawatt-heure)
IAA	Industrie Agro-Alimentaire
IT	Informatique Télécommunication
kW	Kilowatt (kWh kilowatt-heure)
LTECV	Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte
MW	Mégawatt (MWh mégawatt-heure)
NEBEF	Notification d'Echange de Blocs d'Effacement
OPEX	<i>Operating Expenditures</i> (coûts opérationnels)
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Energie
PUE	<i>Power Usage Effectiveness</i> (indicateur d'efficacité énergétique des data centers)
R1	Réserve primaire
R2	Réserve secondaire
R3	Réserve tertiaire
RC	Réserve Complémentaire
RR	Réserve Rapide

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

