Le réseau de l'intelligence électrique

ÉVALUATION DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE ET DES EFFETS DE BORD

associés aux effacements de consommation

RAPPORT COMPLET

Les annexes 1 à 4 du rapport sont issues des expérimentations réalisées sur la base de conventions de tests signées entre RTE et respectivement VOLTALIS ; EDF ; ERDF et EDF. Les résultats de ces expérimentations et leur présentation au sein de ces annexes ont fait l'objet d'une procédure contradictoire et d'une validation de la part des différentes parties signataires aux conventions avant la publication du rapport.

La synthèse et les parties 1 à 4 du rapport présentent le contexte dans lequel s'inscrivent les travaux de RTE, la méthode retenue ainsi que l'analyse et l'interprétation propre à RTE des résultats présentés en annexe.

ÉVALUATION DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE ET DES EFFETS DE BORD

associés aux effacements de consommation

RAPPORT COMPLET

MARS 2016

SOMMAIRE

SYNTHÈSE 6

INTRODUCTION 12

1. CONTEXTE ET DÉFINITIONS 14

1.1 Contexte 14

1.1.1 Évaluation des économies d'énergie associées aux effacements de consommation 14
1.1.2 Mise en évidence de l'existence ou de l'absence d'un profil-type de report de consommation et définition d'un taux de report de consommation 14
1.1.3 Importance des travaux pour l'intégration des effacements dans le système électrique 15

1.2 État des lieux des connaissances sur les économies d'énergie et les effets de bord début 2015 16

1.3 Définition du taux d'économie d'énergie 17

1.3.1 Le taux d'économie d'énergie est calculé par rapport au volume d'énergie effacée 17
1.3.2 Des effets de substitution entre énergies peuvent exister 19

1.4 Sensibilité du taux d'économie d'énergie aux paramètres de calcul 19

1.4.1 Le taux d'économie d'énergie est très sensible à la définition du report de consommation 19
1.4.2 Le taux d'économie d'énergie diffère en fonction du périmètre d'évaluation (un consommateur individuel ou un ensemble de consommateurs) 22
1.4.3 Le taux d'économie d'énergie est sensible au pas de temps de mesure des effacements 24

2. MÉTHODE D'ANALYSE DES RÉSULTATS DES EXPÉRIMENTATIONS 26

2.1 Organisation des travaux 26

2.2 Élaboration d'une trame d'analyse commune 27

3. RÉSULTATS OBTENUS 32

3.1 Secteur industriel 32

3.1.1 Synthèse des retours de l'enquête auprès des sites industriels 32
3.1.2 Étude des effacements réalisés sur le mécanisme d'ajustement 33
3.1.3 Conclusions 34

3.2 Secteur tertiaire 35

3.3 Secteur résidentiel 35

3.3.1 Effacement résidentiel sur l'eau chaude sanitaire 35
3.3.2 Effacement résidentiel sur le chauffage électrique – résultats des expérimentations 36
3.3.3 Effacement résidentiel sur le chauffage électrique – simulations théoriques 46

4. ÉTUDES ÉCONOMIQUES 56

4.1 Impact, pour la collectivité, d'un mauvais choix de taux de report dans les règles des mécanismes de marché 56

4.2 Impact de la prise en compte explicite du report dans les règles sur le couple {RE ; fournisseur} 59

4.3 Bilan et prolongements 61

CONCLUSION 64

ANNEXE 1 72
Évaluation des effets de bord et des économies d'énergie par la méthode du témoin éprouvé dynamique (TED) et variante

ANNEXE 2 : 96
Évaluation du report par la méthode GAM appliquée aux effacements réalisés dans le cadre du mécanisme d'ajustements

ANNEXE 3 104
Évaluation du report pour une méthode de type LASSO appliquée aux effacements réalisés dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance »

ANNEXE 4 122
Évaluation du report par la méthode des panels appliquée aux effacements réalisés dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance »

ANNEXE 5 136
Caractéristiques des simulations théoriques

Liste des figures 140

SYNTHÈSE

L'évolution du rôle du consommateur est une brique fondamentale de la transition énergétique. La définition d'un cadre permettant d'accompagner cette évolution constitue une priorité pour les pouvoirs publics et a notamment conduit à mettre l'accent sur certains leviers d'actions tels que le développement de l'effacement de consommation.

Les dernières années ont ainsi été rythmées par de nombreux débats relatifs à l'émergence de nouveaux opérateurs de service spécialisés dans ce domaine d'activité (ou *opérateurs d'effacement*), qui se sont concrètement traduits par une réforme structurelle entièrement dédiée à l'ouverture du marché de l'électricité français aux effacements de consommation.

La France est le premier pays européen à avoir mis en place un cadre législatif et réglementaire reconnaissant le rôle des opérateurs d'effacement et favorisant leur participation directe aux marchés. Cette évolution structurelle est reconnue au niveau européen et a conduit la *Smart Energy Demand Coalition*, l'association européenne des opérateurs d'effacement, à classer depuis 2 ans la France en tête de son observatoire sur le développement de l'effacement en Europe.

Chaque étape de déclinaison de ce cadre de régulation a permis de progresser dans la connaissance des effacements de consommation et de leurs conséquences physiques sur le système électrique et a naturellement soulevé de nombreuses questions. La dernière en date porte sur la caractérisation et l'évaluation des effets de bord associés aux effacements de consommation. En effet, la participation progressive des effacements aux marchés de l'électricité a mis en évidence la nécessité de prendre en compte divers effets, découlant de l'action des opérateurs d'effacement et pouvant avoir un impact sur le système électrique et les autres acteurs de marché. Il s'agit des *effets rebond,* de *l'anticipation de consommation* ou du *report de consommation*.

RTE a alors proposé à la Commission de régulation de l'énergie (CRE) une feuille de route permettant de mieux appréhender ces phénomènes. Dans sa délibération d'approbation des règles de marché relatives à la valorisation des effacements de consommation du 17 décembre 2014, la CRE a confirmé le caractère prioritaire d'un tel travail, et indiqué que les résultats obtenus devraient permettre d'identifier les modalités les plus pertinentes de prise en compte du report de consommation dans les règles de marché : une prise en compte est-elle nécessaire car l'impact des effets de bord est significatif ? cette prise en compte doit-elle être normative ? dans ce cas, quel taux normatif et quelle forme normative de report retenir ?

Dans le même temps, les discussions parlementaires sur le projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte se sont portées sur la capacité des effacements de consommation à constituer une solution efficace en matière de sobriété énergétique, leur faculté à entraîner à terme des modifications de comportement pour chaque consommateur, et leur plus-value en matière d'informations pour le consommateur.

C'est ce qui a conduit le législateur à placer la notion d'économie d'énergie au cœur du cadre de régulation de l'effacement de consommation, et la Ministre de l'énergie à mandater RTE pour préparer la déclinaison de ce nouveau cadre législatif.

Le présent rapport répond à cette double « commande institutionnelle ».

Définitions

Les travaux menés par RTE en 2015 mettent en évidence l'importance des définitions sur les niveaux de report de consommation et d'économie d'énergie associés aux effacements de consommation.

1. Le taux d'économie d'énergie est calculé par rapport **au volume d'énergie effacée**

Les analyses présentées consistent ainsi à rapporter l'économie d'énergie aux quantités effacées, et ainsi à évaluer l'effet du report sur le fonctionnement du système électrique conformément aux dispositions du nouvel article L. 271-1 du Code de l'énergie.

2. Le taux d'économie d'énergie est très sensible à **la définition du report de consommation**

L'effacement de consommation peut conduire à une reprise immédiate du site qui revient donc à sa consommation « normale » à l'issue de l'action de l'opérateur d'effacement. Cependant, la reprise peut être lente et peut donc conduire le consommateur à retrouver sa consommation normale plus tardivement. Ce phénomène semble logique et peut d'ailleurs s'apparenter aux pentes qui caractérisent le profil d'injection de certains groupes de production.

Dès lors, se pose la question de la qualification de cette sous-consommation et de la définition de la convention de calcul du taux d'économie d'énergie.

Une première convention de calcul consiste à évaluer l'effacement de consommation comme l'intégralité de la diminution de consommation constatée (par rapport à la consommation « normale » du consommateur), et le report de consommation comme l'intégralité de surconsommation constatée (là encore, par rapport à sa consommation « normale ») dans la période suivant l'effacement. On parlera dans ce cas de convention de calcul fondée sur les *baisses de consommation constatées*.

Une seconde convention de calcul définit l'effacement de consommation et le report de consommation par rapport à la seule durée d'action de l'opérateur d'effacement sur les sites. Sont alors comptabilisés comme report de consommation les phénomènes mesurés dès l'achèvement de l'ordre d'effacement, et non au moment du démarrage effectif du phénomène de surconsommation par rapport à la consommation normale du site. Avec cette convention de calcul, dans le cas où la diminution de consommation par rapport à la courbe de référence se poursuit au-delà des ordres d'effacement transmis par l'opérateur, le volume d'énergie économisé jusqu'au démarrage effectif du phénomène de surconsommation est comptabilisé comme un report de consommation « négatif ». On parlera alors de convention fondée sur *les ordres d'effacement*.

3. Le taux d'économie d'énergie diffère en fonction du **périmètre d'évaluation** (un consommateur ou un ensemble de consommateurs)

Les effacements de consommation valorisés sur le système électrique sont le plus souvent le résultat d'une agrégation d'effacements unitaires. Cette agrégation est géographique (de manière à disposer d'un volume important en sommant des effacements individuels de faible puissance) mais aussi temporelle (une succession d'effacements individuels courts permet d'obtenir un effacement long vu du système électrique).

Ces modalités d'agrégation influent fortement sur le calcul des taux de report et le taux de report de la capacité agrégée ne peut être considéré comme la moyenne des taux unitaires.

Or, la déclinaison de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte prévoit la mise en place d'un régime de versement dérogatoire pour les effacements entraînant des économies d'énergie significatives pour chaque consommateur. Au contraire, la prise en compte du report dans les règles de marché nécessite une évaluation de ces effets au périmètre de la capacité valorisée sur les marchés. C'est l'évaluation au niveau de l'agrégat, par responsable d'équilibre, qui doit alors prévaloir. Le cadre juridique mêle donc les deux types d'évaluation, ce qui peut être source de confusion.

* * *

Résultats pour l'effacement industriel

S'agissant des *économies d'énergie*, RTE considère que **les effacements industriels ne conduisent pas, dans le cas général, à des économies d'énergie significatives** et propose de ne pas les rendre éligibles au régime dérogatoire de versement prévu par la loi relative à la transition énergétique.

S'agissant du *report de consommation,* les industriels ont des comportements différents pour définir la période au cours de laquelle le décalage de leur consommation a lieu. À ce stade des analyses, il n'est donc **pas possible de dégager des comportements normatifs pour le report de consommation.** RTE considère donc qu'il sera complexe (voire impossible) d'intégrer une prise en compte explicite normative du report dans les règles de marché pour les effacements réalisés sur des sites industriels.

Cependant, il ressort des échanges avec les opérateurs d'effacement et les industriels que le report de consommation peut être pilotable. RTE propose donc d'instruire en priorité la question du pilotage « au cas par cas » du report de consommation avec les opérateurs d'effacement intéressés afin d'envisager une évolution des règles de marché proportionnée et adaptée à cet enjeu.

Résultats pour l'effacement tertiaire

Peu de sites tertiaires participent actuellement aux mécanismes de marché, et la catégorie « tertiaire » porte elle-même sur des situations très hétérogènes (hypermarchés, petits commerces, froid industriel, traitement des eaux, etc.). Ceci ne permet ni de disposer d'un retour d'expérience suffisant et fiable permettant de considérer qu'il existe des économies d'énergie significatives associées à ces effacements de consommation, ni d'envisager une prise en compte normative cohérente pour l'ensemble de ces effacements.

Des conventions de test avec des opérateurs d'effacement intéressés par ce segment doivent être signées pour permettre d'approfondir les résultats.

Résultats pour l'effacement résidentiel sur le chauffage électrique

Les résultats reposent d'une part sur l'analyse *a posteriori* de plusieurs expérimentations réalisées par des opérateurs d'effacement selon des protocoles, des échantillons, et des modalités d'effacement différents, et d'autre part des simulations théoriques réalisées avec le CSTB (permettant notamment d'évaluer la forme du report de consommation et d'identifier les différents facteurs d'influence).

Les expérimentations et les simulations théoriques mettent en évidence l'**existence d'un report sur une durée longue.** Le phénomène est diffus et il n'existe pas de profil-type de report. Par ailleurs, 24 h après la fin de l'effacement, le taux de report est strictement inférieur à 100 %. **À cette échéance, des économies d'énergie sont donc caractérisées.**

RTE propose de rendre ce type d'effacements éligibles au régime de versement dérogatoire prévu par l'article L. 271-3 du Code de l'énergie.

S'agissant du taux d'économie d'énergie

1. **RTE propose de retenir le taux unitaire basé sur un « client moyen »,** qui semble correspondre à la fois à l'esprit et à la lettre de la loi.

2. **RTE propose de retenir la convention de calcul fondée sur les baisses de consommation constatées.** Cette dernière permet de saisir l'intégralité du phénomène physique « vu du système ».

3. RTE considère légitime d'intégrer les sites ayant une reprise différée à l'analyse. Ceci conduit à **prendre en compte les effets de tous les comportements de report dans l'évaluation du taux.**

4. **Ceci conduit à considérer la plage de [45-75 %] pour le report de consommation à 24 h, sur la base de la convention fondée sur les baisses de consommation constatées.**

5. Au sein de cette fourchette, **RTE propose de retenir la valeur de 50 %,** car elle correspond à l'expérimentation associée aux meilleurs résultats statistiques, elle est cohérente avec les autres résultats obtenus.

Chacune de ces étapes de raisonnement peut faire l'objet de discussions. Lors du débat ayant suivi la présentation des résultats, certains acteurs ont mis en avant d'autres lignes d'interprétation, qui sont détaillées dans le rapport. Enfin, les pouvoirs publics pourraient souhaiter baser la définition du futur cadre réglementaire sur d'autres conventions de calcul du taux et donc sur d'autres valeurs du taux.

De manière générale, **cette première évaluation générique et les enseignements que l'on peut en tirer sont associés à un périmètre de validité spécifique.** Dans de nombreux cas, des prolongements sont d'ores et déjà identifiés (soit au sein des travaux déjà engagés, soit sur la base de résultats expérimentaux non encore exploités) ; ils pourraient conduire à modifier la compréhension actuelle du phénomène de report de consommation. Enfin, seule une normalisation *a priori* des protocoles expérimentaux, telle que celle à laquelle RTE avait appelé fin 2014, permettrait de tester de manière simultanée plusieurs méthodes sur la base d'effacements de même nature.

S'agissant de la prise en compte du report de consommation dans les règles de marché, RTE constate que le report est un phénomène diffus dont la forme et la durée diffère en fonction des sites de consommation. Par ailleurs, le taux dépend largement de la façon dont les effacements sont réalisés (et notamment des modalités d'agrégation retenues par les opérateurs d'effacement). **Il est donc difficile de disposer d'un unique taux de report agrégé pour l'ensemble de ces effacements. RTE alerte sur cette difficulté et les enjeux associés à sa traduction dans les règles de marché dans le cadre de la prise en compte explicite du report de consommation.**

* * *

Études économiques

Du fait des marges d'incertitude associées aux taux présentés et des débats qui continuent d'entourer l'interprétation des résultats, les éléments exposés dans le rapport ne conduisent pas à disposer à coup sûr d'une valeur de référence pour la quantification du report. Dès lors, il apparaît légitime d'évaluer les conséquences qu'entraînerait la fixation de taux normatifs différents des taux réels, sans préjuger de ces derniers.

Il ressort des nouvelles études que le choix d'un taux réglementaire différent du taux réel associé à une capacité d'effacement envoie un signal économique aux acteurs d'effacement qui ne les incite pas à placer les activations de façon optimale pour la collectivité, et qui, par conséquent, réduit la valeur économique apportée par la capacité. Ces « mauvais » placements (au sens de la valeur pour la collectivité) peuvent théoriquement conduire à sous-exploiter le potentiel économique des effacements. En pratique, les analyses quantitatives montrent que l'enjeu associé au choix du taux réglementaire, en termes de perte de valeur collective, est globalement limité, et que, sous les hypothèses testées, le choix d'un taux réglementaire de 50% semble de nature à minimiser le regret résultant de l'écart entre le placement optimal et le placement effectif des effacements de consommation sur les marchés.

Du point de vue redistributif, l'impact pour le couple {RE ; fournisseur}, de l'absence, aujourd'hui, de prise en compte explicite du report dans les règles peut être estimé mais présente des incertitudes selon l'hypothèse sur le coût d'approvisionnement (prix de règlement des écarts, prix spot) pour le fournisseur de l'énergie supplémentaire consommée par ses clients pendant le report. Cet impact est plutôt négatif en estimation médiane (le couple {RE ; fournisseur} gagnerait à ce que le report soit pris en compte explicitement), mais demeure assez faible le cas échéant (1 €/MWh), notamment si on compare son ordre de grandeur à celui du prix de versement (environ 44 €/MWh en moyenne). De surcroit, dans la situation actuelle (quand l'analyse est limitée à l'historique 2015), cet impact est encore réduit (voire inversé) par le niveau exceptionnellement bas des prix actuels.

Perspectives

1. Les travaux présentés dans le rapport ont permis d'élaborer une trame d'analyse de référence pour l'évaluation des effacements et du report de consommation. RTE recommande que cette trame d'analyse soit désormais utilisée pour tester la sensibilité de toute méthode d'évaluation.

2. Pour certaines méthodes expérimentales mentionnées dans le cadre de ce rapport (notamment la méthode des panels, les travaux menés avec DIRECT ÉNERGIE, ou les études envisagées sur l'effacement tertiaire), les travaux ne sont pas terminés. RTE est prêt à les poursuivre. De manière générale, des analyses d'impact de même nature devront à terme avoir été menées sur toutes les méthodes mentionnées afin de n'introduire aucune différence de traitement entre les différents opérateurs.

3. Au titre du retour d'expérience des travaux menés jusqu'ici, on peut noter que les modalités de transmission de données ont souvent été consommatrices de temps et pourraient être améliorées. Or la poursuite des études nécessitera des analyses plus fines (caractéristiques des logements considérés, modalités de constitution des échantillons). La transmission à RTE des données nécessaires à ces analyses devrait en conséquence être facilitée et rendue plus rapide.

4. La mise à jour et le développement des méthodes de certification des effacements (contrôle du réalisé) doit se poursuivre en priorité. À ce titre, les travaux sur les méthodes «site à site», par panels, ou toute autre méthode statistique de prévision de la courbe de référence ou d'évaluation des effacements doivent continuer.

5. La question du pilotage du report de consommation pour les effacements industriels et tertiaires doit faire l'objet d'une instruction prioritaire, conjointement avec les opérateurs d'effacement intéressés.

6. Au-delà des analyses statistiques menées dans les expérimentations, un programme de travail, relevant de la R&D, pourrait porter sur une meilleure compréhension de l'effet d'effacements de durée brève sur la température au sein d'un logement et le confort ressenti par ses occupants, et sur les méthodes de modélisation afférentes. Cette étude pourrait également chercher à évaluer si l'intérêt de l'effacement résidentiel est spécifiquement associé à des phénomènes de gaspillage d'énergie, ou encore l'influence sur le potentiel d'effacement des programmes de rénovation thermiques, d'information des consommateurs ou de renouvellement du parc actuel de radiateurs électriques.

7. Le rapport propose de compléter les études économiques relatives à la mise en place du nouveau cadre réglementaire par les volets suivants :
   - les conséquences de l'application du régime du versement dérogatoire, en matière de placement des effacements, d'impact sur les prix de marché et de conséquences sur les fournisseurs ;
   - l'intérêt de l'effacement comme solution de sobriété énergétique, comparé à d'autres solutions alternatives.

INTRODUCTION

L'effacement de consommation repose sur l'aptitude des consommateurs à adapter temporairement et de façon spécifique leur consommation d'électricité en réponse à un signal externe. Par essence, cette activité « émergente » permet aux consommateurs de participer activement au fonctionnement du système électrique et peut donc contribuer efficacement à l'atteinte des objectifs de la transition énergétique.

Les dernières années ont été rythmées par de nombreux débats relatifs au développement de l'effacement de consommation, et en particulier à l'ouverture des marchés de l'électricité aux consommateurs ou aux opérateurs de service spécialisés dans le domaine de l'effacement (ou *opérateurs d'effacement*). Ces débats – tantôt de nature politique, tantôt de nature technique – ont conduit la France à mettre en place un cadre législatif et réglementaire novateur, et unique en Europe, permettant de valoriser le potentiel de flexibilité des consommateurs sur tous les dispositifs existants du système électrique.

Chaque étape de déclinaison de ce cadre a permis de progresser dans la connaissance des effacements de consommation et de leurs conséquences sur le système électrique et d'élaborer ainsi des règles de marché adaptées aux enjeux (p. ex : en supprimant toutes les barrières à l'entrée et en facilitant les modalités d'agrégation pour les opérateurs d'effacement).

Le dernier débat en date porte sur la caractérisation et l'évaluation des effets de bord associés aux effacements de consommation. En effet, un effacement de consommation peut donner lieu à divers effets, décrits par plusieurs acteurs : *effet rebond, anticipation de consommation, report de consommation*. C'est sur ce dernier effet que portent l'essentiel des débats actuels, en lien avec la déclinaison d'un nouveau cadre législatif qui met en avant la notion d'économies d'énergie associées à l'effacement[1]. Cependant, peu d'éléments quantitatifs permettaient de conclure sur l'impact réel de ces phénomènes sur le système électrique et sur les enjeux liés à leur prise en compte dans les mécanismes de marché.

C'est dans ce contexte et afin d'apporter des éléments de référence au débat sur les effets de bord que RTE a mené des études (conjointement avec certains opérateurs d'effacement et sur la base d'expérimentations menées par ces derniers), réalisé des travaux théoriques sur les effets de bord, et mené des études économiques. En complément, les travaux ont été concentrés sur le report de consommation (dans la mesure où il s'agit de l'effet de bord le plus significatif selon les acteurs) et sur les effacements réalisés sur des chauffages électriques dans le secteur résidentiel (dans la mesure où la plupart des questions relatives à l'effet report se sont concentrées sur ce type d'effacement).

Le présent rapport rend compte de ses travaux réalisés par RTE et des opérateurs d'effacement sur le report de consommation associé aux effacements de consommation.

Après avoir précisé le contexte dans lequel s'inscrivent ces travaux et les définitions retenues (partie 1), le rapport décrit précisément le cadre méthodologique retenu pour l'évaluation des économies d'énergie et des effets de bord afin de disposer d'analyses qui pourront servir de référence (partie 2) dans un contexte où de nombreux chiffres extrêmes et contradictoires ont été publiés, notamment dans les instances du CURTE.

La partie 3 présente une synthèse des résultats obtenus, dont les analyses sont détaillées en annexe.

La partie 4 présente des résultats économiques relatifs aux enjeux d'une prise en compte explicite des effets de bord dans les mécanismes de marché : impact de la prise en compte explicite sur la valorisation des effacements, impact financier sur les responsables d'équilibre et les fournisseurs.

Enfin, les annexes 1 à 4 présentent les résultats détaillés des travaux menés avec les opérateurs d'effacement, sur la base de textes validés conjointement par RTE et les parties aux expérimentations (EDF, ERDF et VOLTALIS).

1. Dans la suite du document, est appelé par abus de langage taux de report, le taux qui évalue le déplacement d'énergie lié à l'effacement (le consommateur ne renonce pas à la consommation mais la déplace dans le temps), il peut effectivement s'agir d'un report de la consommation à une date postérieure à l'effacement, mais également d'une anticipation de consommation. Par ailleurs, dans le cadre des travaux, RTE a cherché à évaluer uniquement le report de consommation associé aux effacements résidentiels (rattrapage de consommation postérieur à l'effacement). Un éventuel effet d'anticipation (possible lorsque le consommateur sait à l'avance qu'un effacement va être activé chez lui) n'a pas été pris en considération, cet effet étant sans doute plus marginal que le report.

1. CONTEXTE ET DÉFINITIONS

1.1 Contexte

Les travaux relatifs à l'évaluation de l'effet report et des économies d'énergie associées aux effacements de consommation répondent à une « double commande » institutionnelle émanant de la Ministre de l'énergie et de la Commission de régulation de l'énergie.

1.1.1 Évaluation des économies d'énergie associées aux effacements de consommation

La Ministre de l'énergie a confié à RTE la rédaction d'un rapport technique permettant de préparer la déclinaison du nouveau cadre législatif relatif aux effacements de consommation introduit par l'article 168 de la loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

En effet, les nouvelles dispositions législatives permettent un traitement différencié selon les catégories d'effacement, et placent les économies d'énergie associées aux effacements de consommation au cœur du nouveau dispositif de régulation des effacements de consommation :

> *« Un effacement de consommation d'électricité se définit comme l'action visant à baisser temporairement, sur sollicitation ponctuelle envoyée à un ou plusieurs consommateurs finals par un opérateur d'effacement ou un fournisseur d'électricité, le niveau de soutirage effectif d'électricité sur les réseaux publics de transport ou de distribution d'électricité d'un ou de plusieurs sites de consommation, par rapport à un programme prévisionnel de consommation ou à une consommation estimée.*
>
> *L'effacement peut avoir pour effet d'augmenter la consommation du site de consommation effacé avant ou après la période d'effacement. La part de consommation d'électricité effacée qui n'est pas compensée par ces effets et qui n'est pas couverte par de l'autoproduction est une économie d'énergie.*
>
> *Des catégories d'effacements de consommation sont définies par arrêté du ministre chargé de l'énergie en fonction des caractéristiques techniques et économiques des effacements concernés ou du procédé au moyen duquel sont obtenus les effacements.*
>
> *[…]*
>
> *Le versement est assuré par le consommateur final pour le compte de l'opérateur d'effacement ou, à défaut, par l'opérateur d'effacement lui-même. Par dérogation, l'autorité administrative peut, pour les catégories d'effacements mentionnées à l'article L. 271-1 qui conduisent à des économies d'énergie significatives, imposer que le paiement de ce versement soit intégralement réparti entre l'opérateur d'effacement et le gestionnaire du réseau public de transport d'électricité. Dans ce cas, la part versée par le gestionnaire du réseau public de transport est fixée par voie réglementaire. Elle est déterminée en fonction des caractéristiques de la catégorie d'effacement, de façon à garantir un bénéfice pour l'ensemble des consommateurs d'électricité sur le territoire national interconnecté. Elle ne peut excéder la part d'effacement mentionnée au même article L. 271-1 qui conduit à des économies d'énergie ».*

Ainsi, le législateur indique sa volonté d'identifier les effacements qui contribuent aux objectifs de sobriété énergique et de leur accorder un régime dérogatoire permettant de faire évoluer les transferts financiers entre opérateurs d'effacement, fournisseurs et consommateurs.

Ce nouveau cadre législatif appelle une déclinaison réglementaire, qui doit être effective un an après l'entrée en vigueur de la loi sur la transition énergétique.

Par courrier daté du 1er décembre 2014, la Ministre a confié à RTE le soin de proposer à l'administration une cartographie des catégories d'effacement et de réaliser des études permettant d'évaluer les économies d'énergie associées aux effacements de consommation.

1.1.2 Mise en évidence de l'existence ou de l'absence d'un profil-type de report de consommation et définition d'un taux de report de consommation

En parallèle, et alors que les discussions parlementaires relatives à l'évolution du régime des effacements de consommation démarraient, la Commission de régulation de l'énergie a également demandé à RTE de mener de manière prioritaire des travaux sur la quantification de l'effet report de consommation.

Cette demande de la CRE s'inscrivait dans le contexte de l'approbation des règles relatives à la valorisation des effacements de consommation et de la déclinaison du décret « effacements » du 3 juillet 2014 (soit le cadre réglementaire précédant la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte).

Le décret dispose en effet que :

> *« [Les] effets de bord sont pris en compte s'ils sont attestés et significatifs, selon les modalités définies par les règles mentionnées à l'article 3, lors de la certification des effacements de consommation d'électricité, des transferts d'énergie entre les périmètres des responsables d'équilibre concernés et du versement de l'opérateur d'effacement au fournisseur des sites effacés ».*

Il apparaît en conséquence que le pouvoir réglementaire a entendu instaurer un régime de traitement explicite des effets de bord dans les règles de marché. Pour autant, le décret détermine également un régime de charge de la preuve applicable : la prise en compte explicite du report est conditionnée à deux conditions (« attestés et significatifs ») qui doivent être remplies de manière simultanée.

Dans son rapport de concertation, et en l'absence de consensus entre les acteurs de marché sur le report de consommation, RTE avait identifié l'obtention d'éléments quantitatifs précis sur le report de consommation comme un préalable à toute prise en compte explicite du report dans les règles de marché. En l'absence de tels éléments, il existait un risque important de fragilité juridique pour les règles de marché et de « déconnexion » entre les dispositions des règles et la réalité du phénomène physique.

Dans sa délibération d'approbation des règles du 17 décembre 2014, la CRE a, par suite, confié à RTE le soin d'instruire cette question avec pour objectif (1) d'identifier s'il existe (ou non) un profil-type de report de consommation permettant une prise en compte normative du phénomène, (2) de proposer une valeur de référence pour le taux de report et (3) de compléter les méthodes de contrôle du réalisé des effacements de consommation sur la base des méthodes testées pour évaluer le report de consommation.

La demande de la CRE visait donc bien à accroître la connaissance du phénomène de report en matière de forme ou de durée, et d'identifier s'il existait une homogénéité dans les différents reports de consommation observés au regard de la perspective d'une prise en compte normative du report dans les règles.

1.1.3 Importance des travaux pour l'intégration des effacements dans le système électrique

Au-delà des questions relatives à la définition du cadre de régulation des effacements de consommation, les travaux de RTE sur le report de consommation doivent permettre d'affiner la connaissance de l'ensemble des acteurs de marché sur les effacements de consommation et des phénomènes physiques qu'ils induisent.

En effet, un effacement n'a pas la même valeur pour le système électrique selon qu'il est associé ou non à des effets de bord, comme l'illustre par exemple le rapport publié par RTE et ses partenaires le 9 juillet 2015 dans le cadre du chantier Réseaux électriques intelligents. Il existe donc un réel enjeu à disposer d'une analyse quantitative et économique permettant d'informer les acteurs sur l'impact des effacements qu'ils activent et à permettre à terme de favoriser un placement « optimal » des effacements pour la collectivité.

Les stratégies d'activation des opérateurs d'effacement peuvent également différer en fonction du report de consommation qu'ils entraînent : si les signaux économiques adressés aux opérateurs d'effacement intègrent correctement le report de consommation, l'activation des effacements doit avoir lieu aux moments les plus opportuns pour la collectivité. Pour renvoyer ces incitations, une meilleure connaissance du phénomène de report est indispensable.

Par ailleurs, le report de consommation – comme l'effacement – a un impact sur les responsables d'équilibre et les fournisseurs des consommateurs concernés.

Le cadre de régulation des effacements permet désormais de tenir compte de cet impact financier tout en garantissant la totale indépendance de l'opérateur d'effacement à l'égard du fournisseur d'électricité, dans le respect de la loi et des recommandations de l'Autorité de la concurrence. Par symétrie, sous réserve que le

report de consommation ait un impact important sur le système, les responsables d'équilibre et les fournisseurs d'électricité, il semble logique de prévoir dans les règles une manière de traiter ces impacts.

À nouveau, disposer d'une meilleure connaissance du phénomène de report et de son impact sur les fournisseurs semblait donc nécessaire pour permettre au cadre de régulation de renvoyer les bonnes incitations.

1.2 État des lieux des connaissances sur les économies d'énergie et les effets de bord début 2015

Lors du début des travaux restitués dans ce rapport (début 2015), il existait une importante hétérogénéité sur les valeurs de taux de report avancées par les différents acteurs (sur la base de tests ou en l'absence de tests) ainsi que sur les méthodes de tests utilisées par les différents acteurs (empêchant donc une comparaison simple des résultats avancés par chaque acteur).

L'état des lieux des connaissances à cet instant peut être décrit comme suit :

- s'agissant de l'effacement sur sites industriels : l'existence d'un report de consommation ne faisait pas débat en tant que tel auprès des opérateurs d'effacement et industriels actifs sur le segment de l'effacement, mais une forte hétérogénéité des situations était suspectée et la perspective d'une prise en compte normative contestée à ce titre ;
- s'agissant de l'effacement réalisé sur des sites tertiaires : aucun retour d'expérience n'était disponible ;
- s'agissant de l'effacement réalisé sur des sites résidentiels : les valeurs avancées lors des consultations publiques organisées par RTE variaient de 0 % et 100 % et il n'existait aucun consensus entre acteurs sur l'instant et la forme du report, non plus que sur le mode de traitement à retenir pour le report de consommation (prise en compte normative ou « au cas par cas »).

De manière plus précise, on peut lister un certain nombre d'études ou d'expérimentations menées par divers acteurs et permettant de mettre en évidence l'hétérogénéité des résultats et des méthodes testées (et donc l'impossibilité de conclure à cette époque sur une valeur de référence du taux de report).

• RTE

En 2012, RTE a publié dans le cadre du CURTE des premiers éléments de retours d'expérience attestant la présence d'effets de bord associés aux effacements diffus (effacements réalisés dans le cadre du mécanisme d'ajustement sur l'hiver 2011-2012). Ces éléments concluaient à l'existence d'un report de consommation d'une durée relativement longue (durée minimale estimée de 6 à 8 heures), mais ne permettaient pas de déterminer une valeur de taux de report.

• ADEME

En septembre 2014, l'ADEME a publié un avis relatif à l'effacement diffus, faisant suite à une étude réalisée en collaboration avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et la société VOLTALIS.

Concernant le chauffage électrique, l'avis indique un taux d'économies d'énergie de 8 % (modélisation de bâtiments type) à 12 % (résultat issu d'une observation statistique sur 2 800 sites participant à l'expérimentation) rapporté à la consommation journalière de chauffage électrique des logements pour des effacements réalisés en continu sur la journée (effacements de 15 ou de 20 minutes par heure, réalisés pendant 24 heures). L'avis indique par ailleurs que ces effacements conduisent à une perte de confort modérée pour les occupants avec une baisse de la température intérieure estimée à -0,4°C. L'évaluation des économies d'énergie proposée par l'ADEME est rapportée à la consommation journalière, mesure classique des économies d'énergie, et non à l'énergie effacée par l'opérateur d'effacement comme c'est le cas pour les autres évaluations présentées dans le rapport.

Concernant l'eau chaude sanitaire, l'avis de l'ADEME conclut à une absence d'économies d'énergie.

• ENGIE

En septembre 2014, ENGIE a présenté des résultats issus des tests réalisés dans le cadre du démonstrateur Greenlys. L'étude concerne des effacements d'une heure réalisés à 7 h ou à 18 h 30 et évalue le report à une fourchette comprise entre 30 % et 60 %.

• EDF

En juin 2015, EDF a présenté des résultats obtenus dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance ». Ceux-ci concernent deux types d'effacement : des effacements de 2 fois 2 heures dans la journée (la consommation est effacée sur les périodes 9 h-11 h et 18 h-20 h sur

un certain nombre de jours de l'hiver ; des effacements sur la plage 6h-22h en alternant des ordres d'effacement de 10 minutes et des périodes de repos de 20 minutes sur trois groupes de sites). L'étude conclut à un taux de report de 35% pour les effacements de 2 fois 2 heures et à un taux de report de 66% pour les effacements de 16 heures. Dans les deux cas, le report apparait être de longue durée.

• DIRECT ÉNERGIE

Dans le cadre de la concertation, DIRECT ÉNERGIE a fait référence aux travaux menés dans le cadre du projet Modélec, engagé suite à un appel à projet organisé par l'ADEME en 2011 sur les systèmes électriques intelligents dans le cadre du programme Investissement d'Avenir. Le projet Modélec est une expérimentation qui consiste à tester l'effacement de consommation chez des clients résidentiels couplée à une solution technologique de gestion de la consommation. 500 foyers participent à cette expérimentation.

Le tableau ci-dessous résume l'état des lieux des connaissances en 2015.

1.3 Définition du taux d'économie d'énergie

1.3.1 Le taux d'économie d'énergie est calculé par rapport au volume d'énergie effacée

Usuellement, les économies d'énergie sont appréciées au regard de la consommation moyenne d'un site sur une durée représentative (une journée, un mois, un an) – c'est par exemple la méthode utilisée par l'ADEME dans son avis de septembre 2014 mentionné ci-dessus. C'est ainsi que des solutions aussi diverses que l'isolation thermique des bâtiments, l'utilisation de solutions d'éclairage ou de chauffage moins énergivores, ou la mise en place de régulateurs thermiques peuvent être considérées : leur potentiel de réduction de la consommation d'une maison ou d'un appartement est rapportée à la consommation moyenne de ce site, et les solutions d'efficacité énergétique peuvent ainsi être comparées sur la base d'une analyse coût-bénéfice.

L'exercice réalisé au sein du présent rapport diffère de ces analyses sur un point essentiel : les économies d'énergie

Tableau 1 – Synthèse de l'état des lieux des connaissances début 2015

Publications	
Avis ADEME Septembre 2014	Étude réalisée en collaboration avec le CSTB et VOLTALIS : ► 8 à 12% d'économie d'énergie sur le chauffage (le taux d'économie d'énergie est évalué comme le ratio entre la consommation des jours avec effacement et la consommation des jours sans effacement) ; ► 0% sur l'eau chaude sanitaire.
Rapport de RTE sur l'expérimentation « ajustements diffus » Décembre 2012	Existence d'une fonction de report de charge d'une durée de 6 à 8h après l'effacement. Pas d'évaluation en volume à ce stade.
Présentations dans le cadre du CURTE	
Contribution de ENGIE dans le cadre d'un groupe de travail du CURTE le 15/09/2014	Pour des effacements d'1 heure réalisés dans le cadre du projet Greenlys : 30% à 60% de report, durée de report d'1 heure.
Contribution de EDF dans le cadre d'un groupe de travail du CURTE le 03/06/2015	Pour des effacements réalisés dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance », ► effacements continus de 2h (9-11h ou 18-20h) : 35% de report ; ► effacements réalisés sur la plage 6-22h en alternant ordres d'effacement de 10 minutes et repos de 20 minutes : 66% de report.

considérées sont rapportées à une consommation effacée, et non pas à une consommation moyenne afin de s'inscrire dans la définition d'économies d'énergie introduites par l'article L. 271-1 du Code de l'énergie :

> *« L'action visant à baisser temporairement, sur sollicitation ponctuelle envoyée à un ou plusieurs consommateurs finals par un opérateur d'effacement ou un fournisseur d'électricité, le niveau de soutirage effectif d'électricité sur les réseaux publics de transport ou de distribution d'électricité d'un ou de plusieurs sites de consommation, par rapport à un programme prévisionnel de consommation ou à une consommation estimée ».*
>
> *[…]*
>
> *« L'effacement peut avoir pour effet d'augmenter la consommation du site de consommation effacé avant ou après la période d'effacement. La part de consommation d'électricité effacée qui n'est pas compensée par ces effets et qui n'est pas couverte par de l'autoproduction est une économie d'énergie ».*

Les analyses qui en découlent permettent ainsi de conclure sur le lien entre report et économies d'énergie, mais elles ne suffisent pas à dire si les effacements constituent en tant que tels une solution pertinente de sobriété énergétique.

À titre d'exemple, un effacement sans report présentera, au titre du nouveau cadre de régulation des effacements de consommation, d'excellentes propriétés – il n'aura pour autant aucun impact réel en matière de sobriété énergétique s'il est réalisé de manière très ponctuelle. S'agissant d'effacements récurrents sur les installations de chauffage électrique, leur impact pourrait s'avérer plus significatif sur la consommation moyenne d'un site, mais il conviendrait pour cela de pouvoir observer le comportement de certains sites sur toute une année afin de disposer d'hypothèses sur la fréquence des activations : ce travail n'était pas demandé par les pouvoirs publics et n'est pas mené à bien dans le présent rapport.

Par ailleurs, le lien entre effacements de consommation et économies d'énergie conduit à interroger la possibilité que des effacements ponctuels permettent à terme au consommateur de transformer des actions ponctuelles d'effacement en véritable stratégie d'économies d'énergie. Les opérateurs d'effacement, en assistant les consommateurs concernés dans la réalisation d'effacements ponctuels, permettraient de révéler aux consommateurs une information fine sur leurs comportements de consommation et sur la valeur réelle qu'ils accordent à la consommation d'énergie. En ce sens, leur action devrait être encouragée (cette révélation d'information pouvant être considérée comme un bien collectif) selon un cadre incitatif, et ce d'autant plus qu'en « initiant » le consommateur à une meilleure stratégie de consommation, l'opérateur d'effacement perd à terme des potentialités de valorisation (celles-ci étant plus importantes sur des consommateurs peu informés, dont le comportement peut s'apparenter à du gaspillage). Dans ce cas, le développement de l'effacement de consommation devrait être analysé dans le cadre de toutes les politiques d'information (étiquetage énergétique, déploiement de compteurs évolués), et leur efficacité comparée. Là encore, ce type d'analyse n'a pas été mené dans le rapport et pourrait en constituer un prolongement.

Les analyses présentées relient ainsi, explicitement, un report de consommation à une quantité d'énergie effacée ; c'est la différence entre ces deux termes qui constitue l'économie d'énergie.

La figure ci-après représente l'impact d'un effacement réalisé par un opérateur d'effacement sur la courbe de consommation d'un site ou d'un ensemble de sites constituant une capacité d'effacement. L'effacement se traduit par une baisse de consommation des sites y contribuant suite à la sollicitation de l'opérateur d'effacement. Il a comme conséquence des variations de la consommation des sites avant et après la période d'effacement : les effets de bord regroupant des anticipations ou/et du report de consommation.

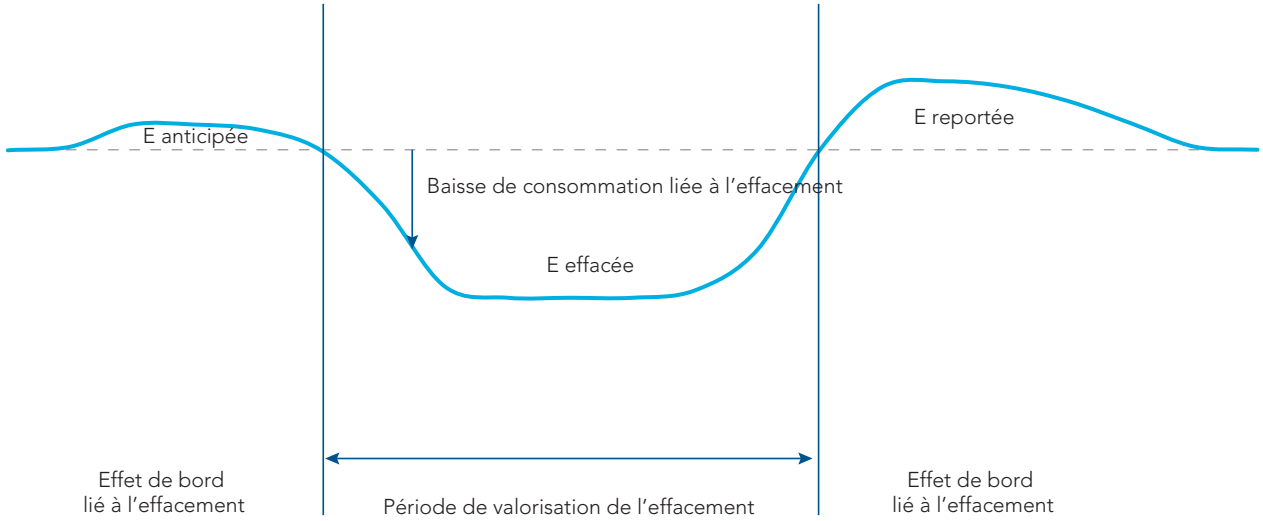
Le taux de report, incluant ici l'énergie anticipée et l'énergie reportée, se définit alors comme suit :

$$Taux\ report = \frac{E\ reportée + E\ anticipée}{E\ effacée}$$

Pour la quantification des économies d'énergie, le taux d'économie d'énergie est défini comme suit (*E différée* correspondant aux rattrapages de consommations à distance de l'effacement, *E subsituée* à la substitution de la consommation d'électricité soutirée sur le réseau vers une autre source d'énergie) :

$$Taux\ économie\ énergie = \frac{E\ effacée - E\ reportée - E\ anticipée - E\ différée - E\ subsituée}{E\ effacée}$$

Figure 1 – Impact d'un effacement sur la courbe de consommation d'un site ou d'un ensemble de sites



1.3.2 Des effets de substitution entre énergies peuvent exister

Il n'y a pas toujours de correspondance parfaite entre les notions d'économies d'énergie et d'effets de bord.

En particulier, la notion d'économies d'énergie est très large et doit conduire à s'intéresser à une éventuelle substitution entre l'électricité soutirée sur le réseau électrique et une autre source d'énergie. Ainsi, un effacement de consommation d'électricité associé à une substitution complète par de l'autoproduction ne donne lieu à aucun effet report mais également à aucune économie d'énergie au sens de la loi relative à la transition énergétique. Cette situation a été identifiée par le législateur (article L. 271-1 du Code de l'énergie) mais sera difficile à traduire en pratique (les comportements de report sur d'autres sources d'alimentation sont difficiles à détecter dans la majorité des cas et la surveillance systématique est impossible).

Face à ces difficultés de prise en compte des phénomènes de substitution par de l'autoproduction, le présent rapport considère toujours que le taux d'économie d'énergie est le complément du taux de report. Il s'agit d'une des limites des analyses présentées.

Ainsi, on considère donc toujours par la suite que :

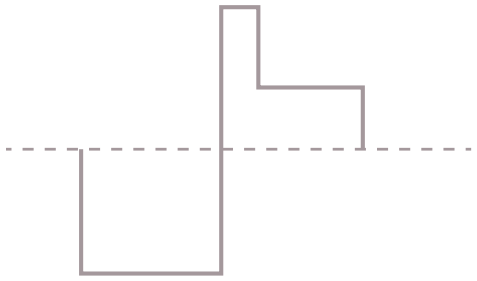
$$Taux\ économie\ énergie = 1 - Taux\ report$$

1.4 Sensibilité du taux d'économie d'énergie aux paramètres de calcul

1.4.1 Le taux d'économie d'énergie est très sensible à la définition du report de consommation

Les représentations classiques décrivent un effacement de consommation comme une baisse de la consommation immédiatement suivie d'un rattrapage rapide de celle-ci conduisant à une « surconsommation » momentanée par rapport à la consommation de référence.

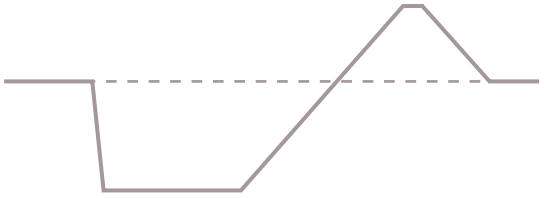
Figure 2 – Représentation d'un effacement associé d'un report immédiat



Les expérimentations menées avec les opérateurs d'effacement amènent à reconsidérer ce schéma traditionnel. En particulier, le profil-type de déformation

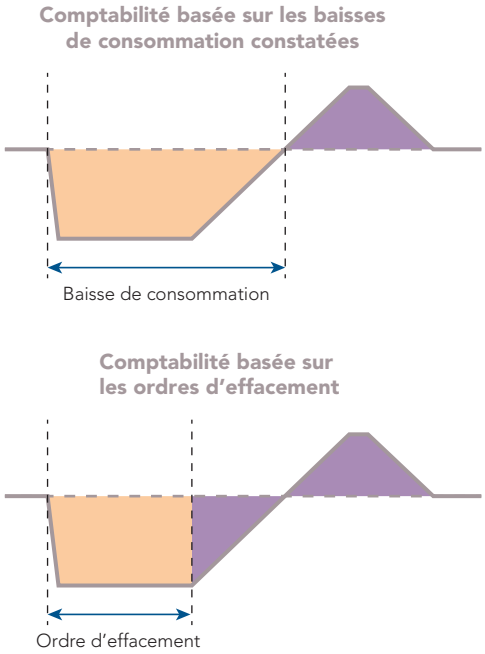
de la courbe de charge associée à un effacement est souvent bien plus complexe : à l'issue de l'action de l'opérateur d'effacement, le redémarrage de la consommation peut être lent, et ainsi conduire à décaler dans le temps le rattrapage de la consommation. Ce phénomène ne semble pas anormal et peut s'apparenter aux pentes qui caractérisent le profil d'injection de certains groupes de production. Les expérimentations ont à cet égard révélé que la représentation commune du report de consommation était trop simpliste par rapport à la réalité du phénomène et qu'elle devrait schématiquement plutôt s'apparenter au schéma ci-dessous.

Figure 3 – Représentation d'un effacement associé d'un report de consommation différé



Il s'agit donc de savoir comment comptabiliser ce volume de sous-consommation apparaissant à l'issue de l'ordre d'effacement : comme une quantité d'énergie effacée, ou en déduction du phénomène de surconsommation observé à l'issue du rattrapage ?

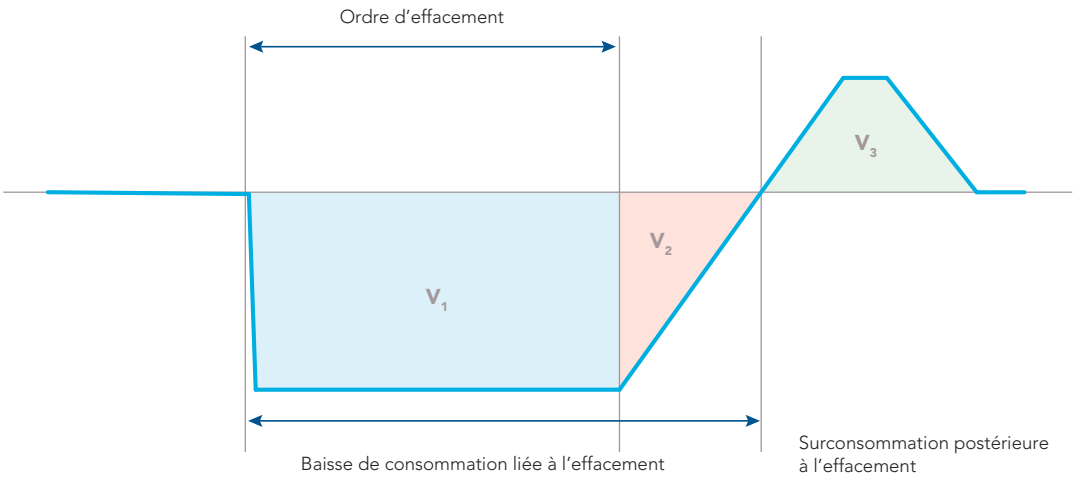
Figure 4 – Conventions de comptabilité des effacements et des effets de bord associés



Ce débat technique revêt en réalité une importance notable, car il en découle deux conventions de calcul différentes :

- la convention basée sur les *baisses de consommation constatées*. L'effacement de consommation est défini comme l'intégralité de la baisse de consommation par rapport à la consommation « normale » du site et le report de consommation comme l'intégralité de la

Figure 5 – Calcul du taux de report sur les ordres activés ou sur les baisses de consommation constatées



surconsommation constatée, là encore par rapport à la consommation normale du site.

- la convention basée sur les *ordres d'effacement*. L'effacement de consommation correspond alors uniquement à la baisse de consommation observée pendant que l'opérateur adresse des ordres d'effacement. Les éventuelles situations de sous-consommation sont considérées comme un report de consommation.

L'application de l'une ou l'autre de ces conventions peut conduire à des évaluations très différentes pour un même phénomène physique sous-jacent.

Dans le cas de la figure 3, ces taux peuvent être calculés de la manière suivante :

- Convention de calcul basée sur les baisses de consommation observées :

$$Taux\ report = \frac{V3}{V1 + V2}$$

$$Taux\ économie\ d'énergie = \frac{V1 + V2 - V3}{V1 + V2}$$

- Convention de calcul basée sur les ordres d'effacement :

$$Taux\ report = \frac{V3 - V2}{V1}$$

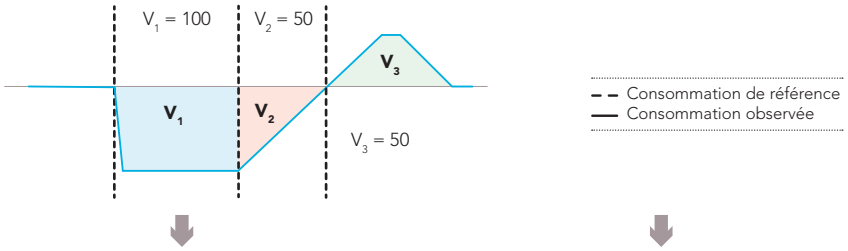
$$Taux\ économie\ d'énergie = \frac{V1 - (V3 - V2)}{V1}$$

Pour tous les travaux, théoriques comme expérimentaux, les résultats obtenus avec les deux conventions sont présentés dans le rapport. Leur mise en regard permet en effet de rendre compte de la sensibilité des évaluations quantitatives aux définitions proposées et d'enrichir la compréhension du phénomène étudié.

La convention de calcul fondée sur les *ordres d'effacement* présente, selon RTE, l'inconvénient de ne pas saisir l'intégralité du phénomène de baisse de la consommation, et de faire dépendre la définition de l'effacement d'une information exogène portant sur les ordres transmis par l'opérateur d'effacement aux sites sur lesquels il opère. Or, du point de vue du système électrique, l'action propre de l'opérateur d'effacement importe peu ; ce qui compte est la baisse de consommation effectivement constatée ainsi que la dynamique de remontée de la consommation. Des opérateurs d'effacement utilisant des techniques différentes de transmission des ordres pourraient alors être traités différemment alors même que leur effet sur la consommation des sites serait identique, et par prolongement il pourrait même en résulter un biais à la « sous-déclaration » des ordres d'effacement de manière à réduire artificiellement le taux de report obtenu. Ces effets ont fait l'objet d'appréciations divergentes dans le cadre des travaux expérimentaux (voir Annexe n°1).

Cette problématique n'est, par ailleurs, pas propre à l'effacement. En matière de production d'électricité, c'est bien la totalité de la production d'un groupe, y

Figure 6 – Exemple numérique de l'impact des différentes conventions de comptabilisation de l'effacement et des effets de bord associés



Taux de report fondé sur les baisses de consommation constatées

$E_{effacée} = V1 + V2 = 150$

$E_{reportée} = V3 = 50$

$Taux = \frac{V3}{V1 + V2} = 33,3\%$

Taux de report fondé sur les ordres d'effacement

$E_{effacée} = V1 = 100$

$E_{reportée} = V3 - V2 = 0$

$Taux = \frac{V3 - V2}{V1} = 0\%$

compris les « rampes », qui est prise en compte – par exemple dans le mécanisme d'ajustement – indépendamment de l'action physique du producteur. Dit autrement, peu importe par exemple que l'exploitant d'une turbine à gaz ait décidé de démarrer puis d'arrêter la production à tel moment, ce qui compte est bien ce que la turbine injecte sur le réseau tel que cela peut être mesuré par RTE.

La convention de calcul fondée sur les *consommations constatées* ne présente pas ce type d'inconvénients et permet de saisir l'intégralité du phénomène physique « vu du système électrique » en s'affranchissant de toute donnée basée sur les ordres d'effacement. En revanche, elle soulève la question de la borne au-delà de laquelle le phénomène de sous-consommation ne peut plus être pris en compte.

Sur le plan réglementaire, RTE considère que les deux approches – basées sur les effacements constatés ou les ordres d'effacement – sont possibles. La discussion conduit néanmoins à distinguer :

- l'évaluation du caractère « significatif » des économies d'énergie – rapportées aux quantités effacées : il s'agit alors de « se faire une idée » de l'impact des effacements sur la consommation, et alors il semble à RTE que la convention de calcul basée sur les baisses de consommation constatées constitue intrinsèquement une évaluation plus juste du phénomène ;
- l'évaluation du taux de report dans le cadre d'une éventuelle prise en compte normative des effets de bord dans les mécanismes de marché : il s'agit alors d'assurer la cohérence entre l'évaluation du taux de report et le volume d'effacement certifié par RTE.

S'agissant de cette seconde étape, il est nécessaire de garantir une correspondance entre les volumes comptabilisés comme des effacements et la détermination des effets de bord. En d'autres termes : si la convention de calcul basée sur les baisses de consommation constatées est retenue comme référence, l'opérateur d'effacement doit pouvoir valoriser sur les marchés la totalité de la baisse de consommation ; si c'est la convention de calcul fondée sur les ordres d'effacement qui est privilégiée, il doit ne pouvoir valoriser que les baisses de consommation coïncidant avec l'envoi des ordres d'effacement. Les travaux liés aux méthodes de certification des effacements devront permettre le maintien de cette cohérence, la faculté des méthodes actuelles à prendre en compte de manière effective les « pentes » étant aujourd'hui un point en discussion.

1.4.2 Le taux d'économie d'énergie diffère en fonction du périmètre d'évaluation (un consommateur individuel ou un ensemble de consommateurs)

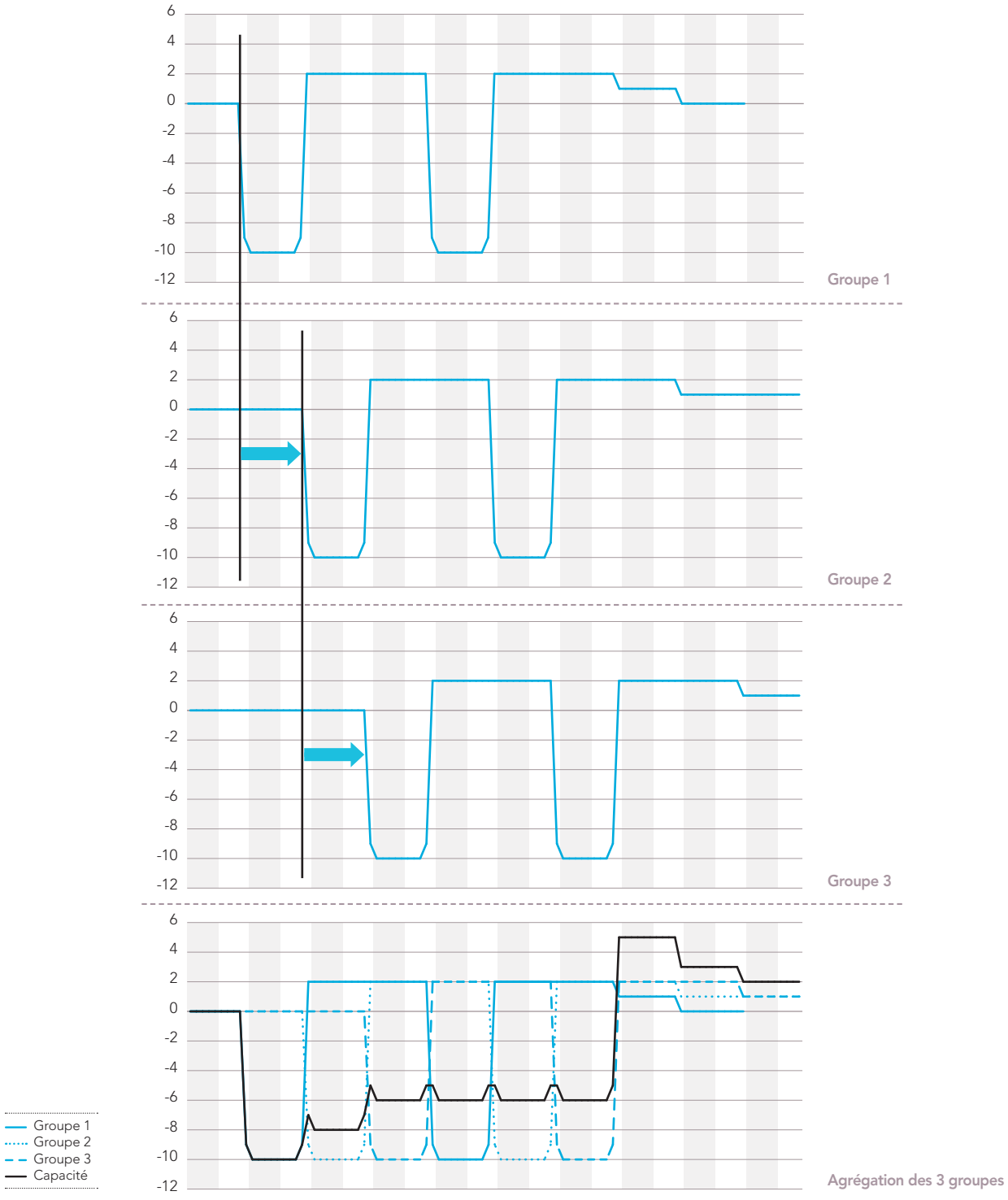
Les effacements de consommation valorisés sur le système électrique sont le plus souvent le résultat d'une agrégation d'effacements unitaires. Cette agrégation est géographique (de manière à disposer d'un volume important en additionnant des effacements individuels de faible puissance) mais aussi temporelle (une succession d'effacements individuels courts permet d'obtenir un effacement long vu du système électrique). Dans le secteur résidentiel, un procédé classique consiste ainsi à faire s'effacer des sites les uns après les autres : il s'agit d'un effacement tournant, ou encore cascado-cyclique (les effacements réalisés ne sont pas effectués de manière synchrone : pendant qu'un groupe de site s'efface, l'autre peut reprendre sa consommation).

Or, à économies d'énergies inchangées, ces modalités d'agrégation influent fortement sur le calcul des taux de report. Pour évaluer le taux de report associé à l'effacement agrégé, il n'est dès lors plus possible de procéder à une simple moyenne des taux unitaires.

D'un point de vue quantitatif, les effets associés peuvent être majeurs. Sur l'exemple théorique simple présenté ci-après, on montre que les écarts entre les taux constatés au niveau de chaque groupe ou de l'agrégat peuvent être de l'ordre de 25 points. Et certaines des configurations observées dans les expérimentations présentées dans la partie 3 du rapport permettent effectivement d'observer ce phénomène, les taux variant du simple au double. Cette caractéristique des évaluations menées sur le taux de report est loin d'être anecdotique, c'est au contraire un paramètre dimensionnant pour la déclinaison du cadre de régulation des effacements de consommation. Ceci entraîne une difficulté spécifique de mise en œuvre.

La déclinaison de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte prévoit en effet la mise en place d'un régime de versement dérogatoire pour les effacements entraînant des économies d'énergie significatives pour *chaque* consommateur (article L. 271-1). Pour ces catégories, elle prévoit un régime de versement assis sur l'économie d'énergie réalisée par chaque consommateur pour chaque effacement. L'approche requise consiste alors à rechercher des économies d'énergie par site et donc à disposer de taux unitaire défini pour un client moyen.

Figure 7 – Exemple d'effacements réalisés à partir de 3 groupes tournants



Sur cet exemple, les résultats suivants sont obtenus :

Taux de report évalué au périmètre de la capacité agrégée (agrégation des 3 sous-groupes)	21 % (79 % d'économies d'énergie)
Taux de report évalué au périmètre de chacun des sous-groupes constituant la capacité	45 % (55 % d'économie d'énergie)

Or, la prise en compte explicite des effets de bord dans les règles de marché nécessite au contraire une évaluation de ces effets au périmètre de l'agrégat valorisé sur les marchés. C'est l'évaluation au niveau de *l'agrégat*, par responsable d'équilibre, qui doit alors prévaloir.

Le cadre réglementaire mêle donc les deux types d'évaluation. RTE alerte sur la confusion qui en résulte dans le débat public et sur la complexité associée en matière de déclinaison opérationnelle.

Pour définir les catégories d'effacement permettant des économies d'énergie significatives et les taux pouvant être associés à ces catégories dans le cadre de la déclinaison du régime de versement dérogatoire prévu à l'article L. 271-3 du code de l'énergie, RTE propose de retenir un périmètre d'évaluation à la maille de chaque consommateur. En matière de méthode, c'est donc un *taux unitaire moyen* représentant l'économie réalisée par un consommateur participant aux effacements qui a été recherché dans le cadre de ces travaux. Pour toutes les expérimentations présentées dans ce rapport, les résultats sont présentés sur la base de taux unitaire.

Dans certains cas, des taux agrégés par capacité sont également présentés afin de mettre en évidence la différence avec le taux unitaire, pourtant calculé sur la base des mêmes effacements. Ces résultats permettent de disposer de premières évaluations relatives au phénomène de report de consommation agrégé et de déterminer ainsi si un profil-type de report peut se dégager pour prévoir une prise en compte normative du report dans les règles.

1.4.3 Le taux d'économie d'énergie est sensible au pas de temps de mesure des effacements

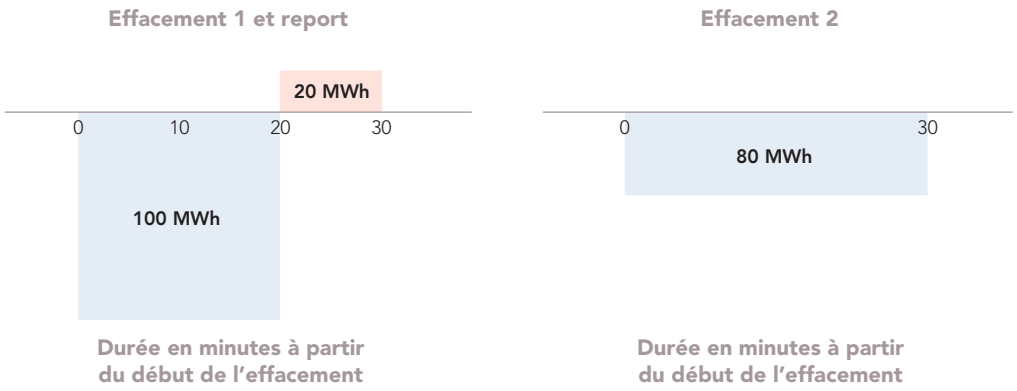
Le pas de temps utilisé pour mesurer les effacements est également susceptible d'influer sur la détermination des taux. Cette influence peut être matérialisée par un exemple simple basé sur la comparaison de deux effacements aux profils différents :

- un effacement de 100 MWh pendant 20 minutes suivi par un report de 20 MWh pendant 10 minutes également. Le taux de report associé à cet effacement est de 20%,
- un effacement de 80 MWh pendant 30 minutes, sans report.

Ces deux effacements sont strictement équivalents en matière de maîtrise de la consommation énergétique : ils permettent tous les deux une économie de 80 MWh. Ils devraient donc être traités de manière équivalente. Pour autant, l'évaluation de taux de report selon qu'elle est faite en analysant les consommations à un pas de temps 10 ou 30 minutes peut aboutir à un taux de report de 20% ou à l'absence de report.

Ce cas de figure peut être généralisé de la manière suivante, au-delà de la question des pas de temps : faire le lien entre le report et les économies d'énergie peut aboutir à traiter de manière très différente des actions sur la consommation qui ont le même contenu en matière d'économies d'énergie.

Figure 8 – Deux effacements équivalents en énergie



2. MÉTHODE D'ANALYSE DES RÉSULTATS DES EXPÉRIMENTATIONS

RTE a mis en place des conventions de tests avec les acteurs de marché volontaires ou toute autre entreprise souhaitant proposer des méthodes d'évaluation du report de consommation. Ces conventions ont pour objet de faire émerger de nouvelles méthodes de contrôle du réalisé – permettant la certification des effacements sur les marchés – et d'encadrer les conditions de test de ces méthodes ; elles constituent désormais l'outil principal utilisé par RTE pour échanger dans un cadre juridiquement sécurisé avec les opérateurs et pour encadrer la publication des résultats. Dans le cas des travaux restitués dans le présent rapport, elles ont systématiquement porté d'une part sur des effacements réalisés dans secteur résidentiel, et d'autre part sur des données collectées antérieurement à l'entrée en vigueur des conventions selon des protocoles définis hors du cadre de celles-ci.

2.1 Organisation des travaux

Les conventions permettent de tester différentes méthodes d'évaluation des économies d'énergie et des effets de bord (par différence entre une courbe de référence et une courbe de consommation) et de l'appliquer à un échantillon statistique d'effacements dans le cadre spécifique d'une expérimentation. Elles ont permis d'obtenir des résultats maîtrisés, partageables, associés à un domaine de validité et un degré de confiance connus.

Pour toutes les conventions, les travaux ont été organisés de la manière suivante :

- l'opérateur d'effacement transmet les données sur lesquelles vont reposer les travaux d'évaluation, ainsi que toutes les informations nécessaires à l'analyse des résultats. Les données peuvent être liées à des effacements réalisés dans le cadre des mécanismes de marché existants (mécanisme d'ajustement ou NEBEF) ou être issues de protocoles de tests spécifiquement mis en œuvre. Les données utilisées dans le cadre des tests sont celles fournies par les opérateurs d'effacement, elles n'ont pas donné lieu à des contrôles particuliers de la part de RTE, au-delà le cas échéant des contrôles prévus par les règles du mécanisme d'ajustement ou par les règles NEBEF ;
- chacune des parties peut proposer des méthodes d'évaluation du report et des économies d'énergie, les méthodes soumises aux tests doivent être précisément décrites avant d'engager les travaux ;
- les méthodes et les résultats obtenus font l'objet d'une analyse croisée afin notamment (i) de consolider les analyses effectuées, (ii) de faire émerger des variantes des méthodes initialement proposées ;
- une fois la méthode validée, RTE communique les résultats obtenus aux différentes parties ayant contribué aux travaux. Chacune des parties a alors la

Signataires avec RTE	Date	Méthode testée	Cadre d'expérimentation des effacements
VOLTATIS	16 février 2015	Méthode statistique de prévision de type GAM calée sur l'historique (proposée par RTE)	Expérimentation ajustement diffus
VOLTATIS	16 février 2015	Méthode TED (proposée par Voltalis) par comparaison de groupes miroirs et variante proposée par RTE	Effacements réalisés spécifiquement pour cette expérimentation
DIRECT ÉNERGIE	16 février 2015	Méthode testée dans le cadre du projet Modelec	Effacements réalisés dans le cadre du projet Modelec
EDF	20 mai 2015	Méthode statistique de prévision de type LASSO calée sur l'historique (proposée par EDF)	Expérimentation « Une Bretagne d'avance »
ERDF et EDF	5 octobre 2015	Méthode des panels (proposée par EDF et ERDF)	Expérimentation « Une Bretagne d'avance » *(NB : même échantillon statistique que pour la méthode LASSO)*

possibilité de formuler des remarques et une analyse contradictoire qui sont jointes aux éléments publiés *in fine* par RTE (dans le présent rapport ou dans les retours d'expérience prévus dans les règles NEBEF).

2.2 Élaboration d'une trame d'analyse commune

Compte tenu de la diversité des éléments ayant donné lieu à communication sur le report relatif aux effacements diffus, RTE a souhaité proposer une trame d'analyse commune d'évaluation et d'analyse des résultats destinée à être appliquée de la manière la plus homogène possible pour toutes les expérimentations. Celle-ci repose sur les étapes suivantes :

• Description des conditions expérimentales

Les expérimentations ayant chacune leurs particularités, les restitutions s'attachent à retranscrire toutes les informations nécessaires pour appréhender la portée des résultats obtenus. RTE a retranscrit les informations à sa disposition concernant les protocoles de tests, notamment :

- les caractéristiques des logements concernés (*a minima* nombre de sites, type de logements, zone géographique) ;
- le schéma retenu pour les effacements (durée, effacements continus ou tournants), le mode opératoire de l'effacement (coupure franche, abaissement de la consigne de température, etc.) ;
- le calendrier des effacements activés.

Dans ces expérimentations, seule la consommation électrique concernée par l'effacement est analysée. Les impacts sur d'autres consommations électriques (par exemple report sur des logements voisins) et le transfert de la consommation électrique sur une autre source d'énergie ne sont pas pris en compte.

• Description des traitements préalables sur les données

Pour chacune des expérimentations, les traitements préalables sur les données sont décrits (notamment modalités de traitement des valeurs manquantes, non prise en compte de périodes considérées comme atypiques, etc.). Ces traitements pourraient en effet, dans certains cas, être susceptibles d'influencer les résultats obtenus ; RTE a donc souhaité les rendre transparents. Dans certaines expérimentations, il a été possible d'analyser la sensibilité de ces traitements sur les résultats ; dans d'autres, ce travail reste à faire.

• Description de la méthode d'élaboration de la courbe de référence et évaluation de sa qualité sur des périodes sans effacement

Chacune des expérimentations repose sur l'élaboration d'une courbe de référence qui permet d'estimer la consommation des logements pendant les périodes d'effacement et les périodes d'observation du report.

La courbe de référence est issue d'une modélisation utilisant (i) les données de consommation des logements pendant les périodes de repos (soit les périodes durant lesquelles la consommation n'est pas influencée par un

Précisions sur l'importance de l'élaboration d'une courbe de référence fiable et les méthodes de construction d'une courbe possibles

L'évaluation des effacements – et en particulier leur certification lorsqu'ils sont valorisés sur les marchés – repose sur la comparaison entre une mesure effective de la consommation d'un site ou d'un ensemble de sites d'une part, et une référence de ce qu'aurait été la consommation de ce site ou de cet ensemble de sites en l'absence d'effacement d'autre part. On parle alors respectivement de *courbe de consommation* et de *courbe de référence* pour représenter ces consommations réelles et fictives.

Un enjeu majeur réside dans l'établissement des courbes de référence, c'est-à-dire dans la définition de normes sur le comportement des sites dans des cas de figure par définition difficilement observables. Dans le cadre des mécanismes de valorisation des effacements sur le mécanisme d'ajustement ou les marchés de l'énergie, différentes méthodes pour établir la courbe de référence ont été définies (méthode du rectangle simple, méthode du rectangle à double référence corrigée, méthode du rectangle algébrique site à site, méthode par prévision) et plusieurs travaux en cours visent à allonger cette liste.

(suite)

La comparaison de la courbe de consommation avec la courbe de référence, si elle est réalisée sur une période suffisante, permet non seulement de calculer le volume d'énergie effectivement effacé durant l'action de l'opérateur d'effacement, mais également de déterminer la forme et l'amplitude des effets de bord. Naturellement, la pertinence de ces évaluations repose intégralement sur la crédibilité des méthodes utilisées pour déterminer la courbe de référence.

De faibles écarts entre les courbes peuvent en effet entraîner des écarts importants dans l'évaluation du report. Cette sensibilité est illustrée par la figure ci-dessous, qui représente la courbe de charge associée à un effacement d'une heure caractérisé par un report de 50 % de l'énergie effacée sur les 8 heures consécutives à l'effacement : le report est important en terme relatif mais très diffus (la courbe de consommation et la courbe de référence demeurent relativement proches pendant toute la durée consécutive à l'effacement).

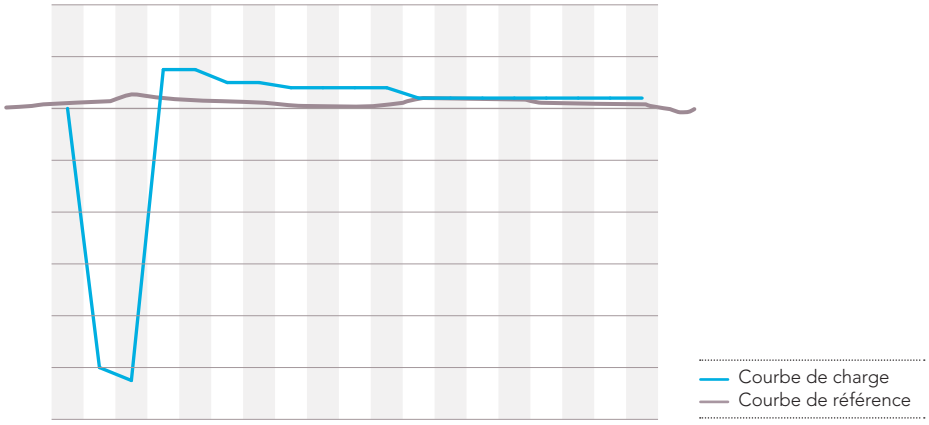
En décembre 2014, RTE a proposé de ranger ces méthodes en trois catégories selon la nature de l'évaluation pratiquée.

- *Évaluation au cas par cas :* le taux de report, sa forme, sa durée sont établis effacement par effacement lors de la certification (évaluation conjointe de l'effacement réalisé et des effets de bord associés en utilisant la courbe de référence) ;
- *Évaluation statistique :* le taux de report, sa forme, sa durée sont établis par opérateur d'effacement, voire capacité par capacité lorsque l'opérateur intègre dans son portefeuille plusieurs catégories d'effacement, par une analyse ex-post sur une durée suffisamment longue et sur un nombre d'effacements réalisés significatifs ;
- *Évaluation statistique et normative :* le taux de report, sa forme, sa durée sont établis par des analyses ex-post par catégorie d'effacement et s'appliquent à tous les acteurs de marché réalisant des effacements pour cette catégorie.

Les travaux restitués dans ce rapport portent sur des évaluations statistiques et normatives.

Le choix de concentrer les travaux sur ce type de méthode permet de répondre aux évolutions du cadre législatif mentionnées ci-dessus. L'article L. 271-1 du Code de l'énergie précise ainsi que *« des catégories d'effacements de consommation sont définies par arrêté du ministre chargé de l'énergie en fonction des caractéristiques techniques et économiques des effacements concernés ou du procédé au moyen duquel sont obtenus les effacements »*, tandis que l'article L.271-3 identifie « les catégories d'effacements mentionnées à l'article L. 271-1 qui conduisent à des économies d'énergie significatives ».

Figure 9 – Représentation d'un effacement d'une heure suivi d'un report de 50 % pendant huit heures



effacement ou les effets de bord associé à celui-ci), et/ou (ii) les données de consommation d'autres sites dont le comportement est proche et qui peuvent donc servir pour réaliser une estimation du comportement hors effacement.

• Analyse de sensibilité de la courbe de référence

La qualité de la courbe de référence est évaluée sur les périodes de repos par des indicateurs classiquement utilisés en statistique :

► Erreur moyenne en valeur absolue rapportée à la consommation instantanée (MAPE) :

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{|\text{consommation de référence (t) - consommation réalisée (t)}|}{\text{consommation réalisée (t)}}\right)$$

► Erreur moyenne rapportée à la consommation instantanée (MPE) :

$$MPE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{\text{consommation de référence (t) - consommation réalisée (t)}}{\text{consommation réalisée (t)}}\right)$$

L'indicateur MAPE permet d'évaluer l'erreur moyenne de prévision par pas de temps, une valeur faible indique une bonne qualité de prévision. L'indicateur MPE permet de détecter un éventuel biais de la courbe de référence (tendance à la sous- ou à la surévaluation de la courbe de référence). Dans le cadre de cette étude, la valeur de MPE est essentielle, un MPE trop différent de zéro indique que le courbe de référence n'est pas centrée en moyenne sur la consommation réelle ; cela conduira potentiellement à un biais dans l'évaluation du report.

De manière générale, il est préférable d'évaluer les MAPE et MPE sur des périodes qui n'ont pas servi à caler le modèle, sinon la qualité de la courbe de référence est surestimée dans le cadre de son utilisation pour estimer le report associé aux effacements. En effet, les indicateurs statistiques visent surtout à regarder si la courbe de référence est proche de la courbe de consommation constatée pendant les périodes de repos (hors effacement). Cela nécessite donc de se placer « hors calage ».

• Description du calcul des taux de report

Une fois la qualité de la courbe de référence analysée, le calcul du taux de report entre les différentes expérimentations a été uniformisé.

Les deux conventions de calcul du taux de report présentées au § 1.4.1 sont utilisées : convention fondée sur les baisses de consommation constatées et une convention fondée sur les ordres d'effacement.

► Pour la convention de calcul fondée sur les ordres d'effacement, les volumes effacés et reportés sont calculés pour chaque période d'évaluation des effets de bord i comme suit (t_{eff} représentent les pas de temps pour lesquels des ordres d'effacement sont envoyés aux sites contribuant aux effacements) :

$$\text{Veff (i)} = \sum_{t \in teff} \text{(consommation de référence (t) - consommation réalisée (t))}$$

$$\text{Vrep (i)} = \sum_{t \notin teff} \text{(consommation réalisée (t) - consommation de référence (t))}$$

► Pour la convention de calcul fondée sur les baisses de consommation constatées, RTE a choisi de borner la prise en compte des effets des effacements à 3 heures[2] après la fin des ordres envoyés en cohérence avec les éléments

2. Cette limite de 3 heures est arbitraire, mais il semble raisonnable de penser que 3 heures après la fin de l'ordre, un éventuel prolongement de la baisse de consommation liée à l'ordre d'effacement est terminé. La limite vise par ailleurs à ne pas comptabiliser comme du report ou de l'effacement les oscillations inévitables entre la courbe de référence et la courbe des sites effacés lorsque les niveaux de consommation sont redevenus proches.

observés dans les travaux menés avec les différents opérateurs d'effacement. Les volumes effacés et reportés pour chaque période d'évaluation des effets de bord i sont alors calculés comme suit :

$$\text{Veff (i)} = \sum_{\substack{\text{pas de temps t<3 heures} \\ \text{après fin effacement}}} \max(\text{consommation de référence (t)} - \text{consommation réalisée (t)};0)$$

$$\text{Vrep (i)} = \sum_{\substack{\text{pas de temps t<3 heures} \\ \text{après fin effacement}}} \max(\text{consommation réalisée (t)} - \text{consommation de référence (t)};0)$$

$$+ \sum_{\substack{\text{pas de temps t>3 heures} \\ \text{après fin effacement}}} (\text{consommation réalisée (t)} - \text{consommation de référence (t)})$$

Pour les deux conventions de calcul, les énergies effacées d'une part et reportée d'autre part sont sommées pour les N effacements réalisés dans le cadre du protocole de tests. Les taux de report moyens sont enfin calculés par division de la somme des énergies reportées par la somme des énergies effacées pour les N effacements.

$$\textit{Taux report} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \text{Vrep(i)}}{\sum_{i=1}^{N} \text{Veff(i)}}$$

• Évaluation de l'incertitude sur les résultats obtenus

Les imperfections inhérentes à la construction de la courbe de référence peuvent induire une incertitude sur l'évaluation du taux de report. En effet, la courbe de référence utilisée dans le calcul du taux de report peut, tout en étant de bonne qualité du point de vue de l'erreur moyenne, biaiser la mesure de ce taux. RTE a donc cherché une démarche permettant d'évaluer l'incertitude liée au calcul d'un taux de report.

L'évaluation de l'incertitude relative à l'estimation du report sera réalisée en utilisant les trois méthodes suivantes :

- *Calcul de la distribution des MAPE et MPE sur des périodes au repos comparables à celles sur lesquelles le report est évalué.* Les indicateurs précédemment décrits de MAPE et MPE, sont calculés sur des périodes au repos (pour lesquelles on dispose de la courbe de référence et d'une consommation réalisée non influencées par un effacement) tirées au hasard. Les périodes au repos doivent avoir la même structure que les périodes d'évaluation du report. Par exemple, si le report est évalué sur 24 effacements et sur une durée de 8 heures pour chaque effacement, on tire au hasard 100 fois 24 périodes au repos de 8 heures. La distribution des indicateurs est calculée sur ces 100 tirages. Plus la moyenne est centrée sur zéro et la distribution faible, plus l'évaluation du report peut être associée à un intervalle de confiance resserré. Pour mener à bien cette analyse, les périodes de repos doivent être suffisantes en durée afin de pouvoir disposer de tirages indépendants les uns des autres, sinon l'estimateur ne peut pas être considéré comme représentatif.

- *Calcul de l'incertitude par des techniques de bootstrap.* Le bootstrap est une technique statistique classique d'évaluation de l'incertitude reposant sur une multitude de ré-échantillonnages qui permet d'évaluer la sensibilité d'un résultat à la constitution de l'échantillon de tests. À titre d'exemple, la sensibilité du report sera évaluée en faisant varier le panel des logements pris en compte (tirages aléatoires avec remise des sites de consommation contribuant aux effacements). Cette analyse permet d'estimer la sensibilité des résultats obtenus au choix des sites participant à l'expérimentation.

- *Calcul du pseudo-report.* De la même façon que, pour les indicateurs MAPE et MPE, une distribution de report associé à des effacements fictifs est évaluée sur des tirages aléatoires de périodes de repos de même structure que les périodes utilisées pour l'évaluation du report. Le report ainsi évalué en association à des effacements fictifs, appelé pseudo-report, est calculé de la même manière que le report associé aux effacements effectivement réalisés : on peut alors le comparer à une forme de report « placebo ». Le taux moyen obtenu (idéalement proche de zéro puisqu'il est calculé sur des périodes pour lesquelles il n'y a pas eu d'effacement) et la distribution de pseudo-report donnent une bonne indication sur l'intervalle

de confiance associé à l'évaluation du report pour la courbe de référence considérée. Comme pour les autres indicateurs, les périodes de repos doivent être suffisantes en durée afin de disposer de suffisamment de tirages de périodes d'effacements indépendantes les unes des autres.

Si ces différents éléments permettent d'obtenir des indications relatives à l'incertitude associée aux différents résultats obtenus, compte tenu de la diversité des situations et des cas de figure, ils n'exonèrent pas d'une analyse qualitative à réaliser au cas par cas. En effet, les indicateurs décrits précédemment permettent de qualifier les résultats obtenus avec une méthode donnée, au titre notamment de leur représentativité statistique.

Pour autant, ils ne permettent pas de détecter tous les éventuels biais qui pourraient être inhérents à la méthode retenue. À titre d'exemple, si une méthode repose sur une évaluation du report pendant une période trop courte par rapport à la durée réelle du report, l'estimation sera intrinsèquement biaisée (report sous-évalué par rapport à la réalité). Les indicateurs présentés supra ne permettent pas d'identifier un tel biais.

Ainsi, si la trame d'analyse présentée ci-dessus est importante pour permettre de comparer les résultats obtenus avec les différentes méthodes, elle n'est pas suffisante pour agréer ces méthodes lors de la certification des effacements. Pour ce faire, une analyse au cas par cas des biais propres aux différentes méthodes doit venir compléter la trame d'analyse commune.

3. RÉSULTATS OBTENUS

3.1 Secteur industriel

Au cours des travaux relatifs à l'élaboration des règles de marché pour la valorisation des effacements de consommation, plusieurs industriels actifs sur le segment de l'effacement avaient publiquement fait référence à l'existence et à l'hétérogénéité d'un report de consommation. L'enjeu pour ces acteurs se situait donc plutôt sur les modalités liées à la prise en compte du report dans les règles de marché (prise en compte normative ou « au cas par cas », prise en compte physique ou financière) que dans la détermination d'une valeur de référence pour ce report.

Dans ce contexte, RTE a réalisé ses travaux sur l'évaluation du taux de report de consommation et d'économie d'énergie dans le secteur industriel dans l'optique de valider ou d'infirmer l'hypothèse selon laquelle il existe un report de consommation important dans l'industrie. RTE s'est basé sur une enquête qualitative menée auprès de ses clients industriels (paragraphe 3.1.1) et sur une analyse quantitative du report suite aux effacements réalisés par les clients industriels raccordés au réseau public de transport d'électricité sur le mécanisme d'ajustement entre 2010 et 2014 (paragraphe 3.1.2).

3.1.1 Synthèse des retours de l'enquête auprès des sites industriels

3.1.1.1 Réalisation des entretiens

L'enquête a été menée en 2015 afin de disposer directement auprès d'industriels d'informations sur les effacements qu'ils réalisent, et en particulier sur l'existence ou non d'économies d'énergie. Elle a porté sur des industriels actifs dans le secteur de la métallurgie, de l'électrolyse, du raffinage ou d'autres processus chimiques et participant au mécanisme d'ajustement.

3.1.1.2 Résultats sur l'estimation des économies d'énergie

En matière d'économie d'énergie, trois cas de figure peuvent être distingués :

- Le décalage de la production temporel ou géographique (sur un autre site de production). Dans ce cas de figure, il n'y a aucune économie d'énergie résultant de l'effacement. Il s'agit du cas général pour les industriels raccordés au réseau public de transport d'électricité.
- L'industriel peut également avoir recours à de l'autoproduction (on parle alors de réorganisation de la production). Comme pour le décalage de la production, il n'y a aucune économie d'énergie résultant de l'effacement.
- Le renoncement définitif à la production prévue avant l'activation de l'effacement industriel (ou une partie de cette production). Ce cas de figure apparaît par exemple lorsqu'un outil industriel est utilisé au maximum de ses capacités de production à moyen terme et que l'acteur ne dispose pas d'un autre site de production lui permettant de déplacer sa production ou d'une source d'énergie alternative. Il y a alors des économies d'énergie associées à l'effacement de consommation. Cependant, dans la mesure où l'industriel renonce à honorer une commande, il est fort probable que les offres formulées par les industriels sur les marchés correspondent aux offres au coût variable les plus élevées. Il s'agit d'un cas particulier concernant peu d'industriels.

Les entretiens confirment également les éléments déjà indiqués par les industriels dans le cadre du CURTE sur l'hétérogénéité de leur comportement pour décaler leur consommation. Le report peut être consécutif à l'effacement ou différé dans le temps (reporté à la période suivante d'heures creuses, au week-end suivant, au prochain arrêt, etc.).

Plusieurs opérateurs d'effacement ont cependant fait part à RTE des possibilités associées au pilotage du report de consommation et souhaitent qu'un travail soit engagé pour que les règles de marché puissent rendre possible un tel pilotage.

Si l'absence d'économies d'énergie et la diversité des profils de report semblent établies, dans le cas général, pour les industriels disposant de sites de forte puissance, et notamment les industriels électro-intensifs, ce diagnostic devra être étayé pour les industriels disposant de sites de consommation de puissance plus faible, notamment ceux raccordés aux réseaux publics de distribution d'électricité (« milieu de portefeuille »).

En effet, la participation de ces sites aux mécanismes de marché demeure embryonnaire et le retour d'expérience est donc nécessairement restreint. À ce stade, il semble logique de considérer que ces industriels se comportent

de manière proche des industriels raccordés au réseau public de transport d'électricité car ils sont confrontés aux mêmes problématiques de carnets de commande, de capacité d'utilisation du (ou des) site(s). Pour autant, certains opérateurs d'effacement ont fait part à RTE de certains secteurs d'activité pouvant conduire à des économies d'énergie (p. ex. : production de granulés dans le secteur agroalimentaire).

3.1.2 Étude des effacements réalisés sur le mécanisme d'ajustement

3.1.2.1 Objectifs et démarche

RTE a réalisé une étude quantitative sur les effets de bord associés aux effacements réalisés par des sites industriels sur le mécanisme d'ajustement au cours des années 2010 à 2014.

Une première phase d'analyse exploratoire montre que, pour plusieurs secteurs industriels, l'observation des pas de temps immédiatement avant ou après les périodes d'effacement ne permet pas d'identifier un report (ou une anticipation) immédiat(e) et systématique.

Pour en rendre compte, on considère par la suite des indicateurs de surconsommation autour des périodes d'effacement tel que décrits dans la section 3.1.2.2.

Ces indicateurs sont appliqués aux sites de soutirage raccordés sur le réseau public de transport ayant procédé au moins à trois effacements sur la période d'étude. Avec ce critère de sélection des sites actifs, le périmètre d'étude couvre :

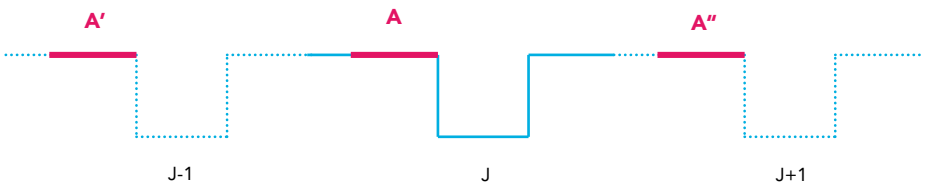
- 24 sites de soutirage sur le RPT dans plusieurs secteurs d'activité différents tels que la métallurgie, le papier, l'électrolyse, la chimie et le ciment ;
- un total de 167 effacements.

3.1.2.2 Définition d'indicateurs quantitatifs de surconsommation

Afin d'évaluer si un effacement peut être associé à un report de consommation sur les heures proches de la période d'activation, la première étape consiste à définir un indicateur de la surconsommation sur les 6 heures précédant l'effacement. Tel qu'illustré par la figure ci-dessous, il s'agit de calculer le ratio entre d'une part la consommation moyenne sur les 6 heures précédant l'effacement et

Figure 10 – Indicateur de la surconsommation sur les six heures précédant l'effacement

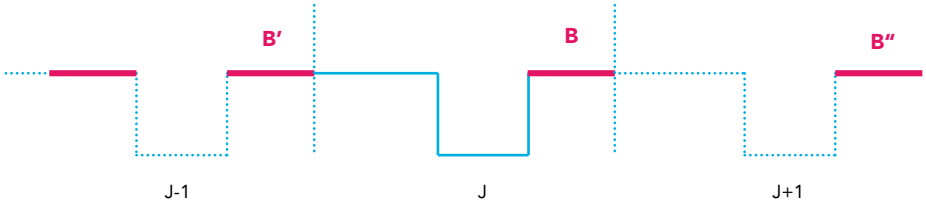
L'indicateur est calculé à partir des données de consommation des sites sur les périodes A (les 6 h précédant l'effacement), A' et A" (les mêmes 6 h sur les jours précédant et suivant) :



$$\text{Indicateur} = \frac{\text{Moy A}}{\text{Moy (A' ; A")}}$$

Figure 11 – Indicateur de la surconsommation sur les six heures suivant l'effacement

L'indicateur est calculé à partir des données de consommation des sites sur les périodes B (les 6 heures suivant l'effacement), B' et B'' (les mêmes 6 h sur les jours précédant et suivant) :



$$\text{Indicateur} = \frac{\text{Moy B}}{\text{Moy (B' ; B")}}$$

d'autre part la consommation moyenne sur 2 périodes de 6 heures comparables : les mêmes heures des jours encadrant le jour de l'effacement (c'est-à-dire J-1 et J+1).

Suivant le même principe, on définit en second lieu un indicateur d'estimation de surconsommation pour les 6 heures postérieures à l'effacement réalisé tel qu'illustré Figure 11.

3.1.2.3 Résultats sur les effets de bord

Les résultats sont présentés ci-dessous sous la forme de la moyenne des indicateurs de surconsommation estimés sur les occurrences d'effacement.

Ces résultats, qui doivent être considérés avec précaution vu le faible échantillon d'effacements observés par secteur, ne conduisent pas à identifier une tendance marquée à l'anticipation ou au report de la consommation pendant les périodes immédiatement antérieures ou postérieures aux effacements.

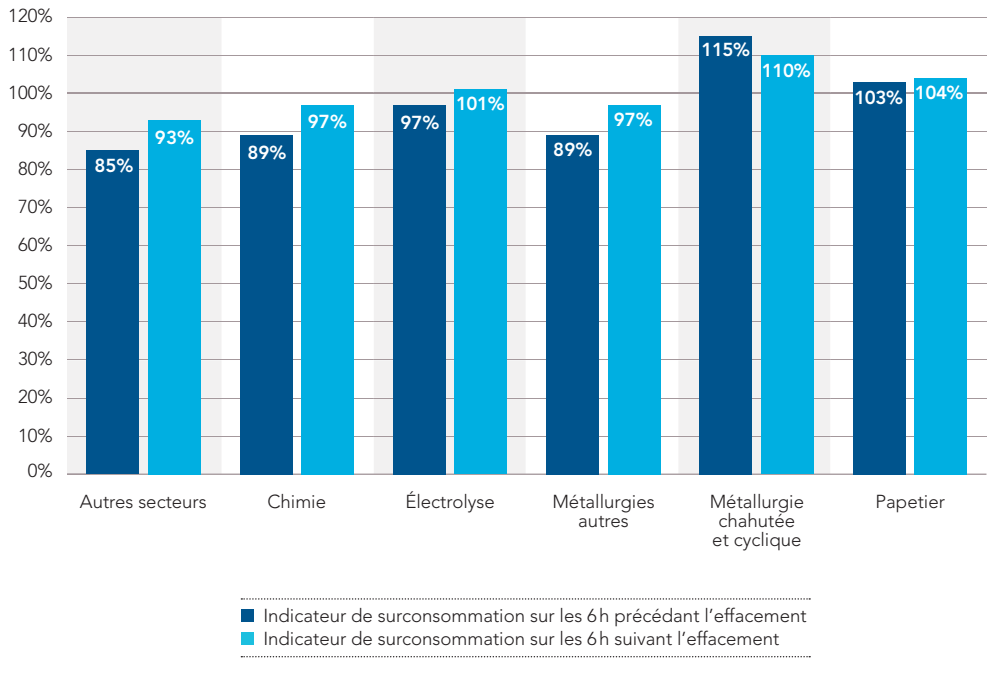
En effet, pour 5 secteurs d'activité sur les 6 observés, on constate que la consommation de ces sites autour des effacements est très proche (voire légèrement inférieure) à la consommation de référence en l'absence d'effacement. Le sixième secteur, la métallurgie, présente une forte variabilité des profils de consommation et une surconsommation de 10 à 15% sur les 6 heures immédiatement antérieures et postérieures aux effacements. Néanmoins, même dans ce cas, l'analyse exploratoire des courbes de charge ne permet pas d'établir un lien direct entre l'effacement et la surconsommation, et encore moins d'établir un profil-type de report.

3.1.3 Conclusions

Dans le cas général, les effacements réalisés sur des sites industriels ne semblent pas conduire à des économies d'énergie ou semblent conduire à des économies d'énergie faibles. En effet, l'effacement ne correspond pas à une renonciation de production des sites industriels mais plutôt à un déplacement de la consommation d'électricité dans le temps, dans l'espace ou sur des dispositifs d'autoproduction.

Par ailleurs, il existe une hétérogénéité importante sur la période de report effectif de la consommation (dans les 24 heures qui suivent l'effacement, dans la semaine, au prochain arrêt du site, etc.). À court-terme, il ne semble donc pas possible d'établir un profil-type de report de consommation. Par ailleurs, dans la mesure où le placement du report peut varier significativement dans le temps (allant de quelques heures à plusieurs mois), il existe donc une question relative à la période

Figure 12 – Indicateurs de surconsommation autour de l'effacement mesurés sur les effacements observés sur le mécanisme d'ajustement.



d'observation du report et de prise en compte du report de consommation dans les règles de marché (quand s'agit-il de report ? quand s'agit-il de flexibilité ?).

Pour les sites industriels, RTE propose donc de considérer dans le cas général que les économies d'énergie ne sont pas significatives et de ne pas les rendre éligibles au régime de versement dérogatoire prévu par l'article 168 de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (même si le taux d'économie d'énergie diffère en fonction des process industriels, il reste faible et le plus souvent nul).

Concernant la prise en compte explicite du report de consommation, RTE considère qu'il n'est pas possible de retenir des coefficients normatifs et une prise en compte physique du report liés aux effacements industriels dans les mécanismes de marché. En effet, les taux et le moment du report varient en fonction du process industriel mais aussi du carnet de commande de chaque industriel.

RTE propose donc de prioriser les travaux permettant de prendre en compte « au cas par cas » le report de consommation, c'est-à-dire de permettre un pilotage du report par les industriels ou leurs opérateurs d'effacement. Plusieurs opérateurs se sont montrés intéressés pour signer des conventions afin d'étudier des pistes de travail sur le sujet.

3.2 Secteur tertiaire

Peu de sites tertiaires participent actuellement aux mécanismes de marché et la catégorie « tertiaire » porte elle-même sur des situations très hétérogènes (hypermarchés, petits commerces, froid industriel, traitement des eaux, etc.).

Dans le cadre de cette étude, RTE a rencontré des industriels ayant manifesté leur volonté de procéder à des effacements sur ce secteur afin de disposer de premiers éléments de contexte utiles dans le cadre de la déclinaison de l'article 168 de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

RTE retient les éléments suivants de ces entretiens :

- comme pour le résidentiel, les effacements tertiaires sont obtenus en activant une multitude d'effacements unitaires de courte durée et de faible puissance, le taux de report dépendra des agrégations retenues et du mode de pilotage des effacements ;
- les opérateurs ont indiqué un volume faible d'économie d'énergie associée aux effacements (avec une estimation de taux moyens de l'ordre de 20 % et des taux variant en fonction des secteurs d'activité), la consommation devant le plus souvent être reportée dans le temps ;
- il n'est pas possible pour les opérateurs, comme pour RTE, de caractériser le report en taux (influence des modes d'agrégation sur le taux effectif de report, en particulier sur les effacements thermiques), en forme et en durée et donc d'envisager un profil-type de report pour ce type de sites.

À ce stade, en l'absence de retour d'expérience fiable et sur la base des entretiens réalisés avec les opérateurs d'effacement, RTE considère qu'il n'est pas possible de considérer que les effacements réalisés sur des sites tertiaires donnent lieu à des économies d'énergie significatives au sens de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte et qu'il n'est pas possible de prévoir une prise en compte normative et physique du report de consommation dans les règles de marché pour ce type de sites.

RTE propose de poursuivre les travaux dans le cadre de conventions avec les acteurs du secteur le souhaitant pour d'une part développer les connaissances théoriques nécessaires à une meilleure compréhension des caractéristiques des effacements tertiaires, et d'autre part partager des analyses concernant des résultats expérimentaux permettant à terme d'envisager une évolution des règles de marché.

3.3 Secteur résidentiel

3.3.1 Effacement résidentiel sur l'eau chaude sanitaire

L'effacement résidentiel a déjà fait l'objet d'analyses de la part de l'ADEME, qui a notamment mentionné le sujet de l'eau chaude sanitaire dans le cadre de son avis publié en septembre 2014. Cet avis mentionne qu'*« afin de déterminer la part de l'effacement qui constitue une économie d'électricité pour les consommateurs, l'ADEME et le CSTB se sont associés pour conduire une étude alliant une modélisation thermique à des observations statistiques en période de chauffe sur un panel de 2800 adhérents à l'offre de la société VOLTALIS*[3] *dans l'ouest de la France. Les résultats de ces campagnes de tests menées de janvier 2012 à avril 2013 font apparaître*

des économies d'énergie pour les effacements de chauffage, mais pas pour les effacements des ballons d'eau chaude sanitaire. »

En effet, l'ADEME a alors considéré que cette absence d'économie d'énergie résultait de ce que « *le ballon étant un système fermé, la résistance aura besoin de plus fonctionner ensuite pour compenser le manque d'apport énergétique résultant de l'effacement* ».

S'agissant des *économies d'énergie,* le taux serait donc proche de 0 % rapporté à l'énergie effacé. S'agissant du *report de consommation*, le taux serait proche de 100 %. Par ailleurs, le report se situerait à la fin de la période nécessaire pour la mise à la température souhaitée du stock d'eau contenu dans le réservoir (période qui peut aller jusqu'à quelques heures).

Dans le cadre des discussions menées entre RTE et VOLTALIS dans le cadre de la convention, VOLTALIS a rappelé que cette hypothèse n'avait pas donné lieu, ni avec l'ADEME et le CSTB, ni depuis, à un protocole spécifique permettant d'obtenir un chiffre précis sur les économies d'énergie réalisables sur les dispositifs d'eau chaude sanitaire. VOLTALIS a affirmé avoir observé fréquemment des situations, après une première période d'une ou deux heures en début de nuit (heures creuses) sans doute consacrée à chauffer l'eau à la température de consigne, la consommation de ces dispositifs s'interrompt longuement, puis reprend plus brièvement une ou plusieurs fois par la suite, témoignant ainsi de fuites thermiques voire de fuites d'eau. Selon VOLTALIS, différer la consommation initiale aurait alors pour effet d'éviter ces consommations ultérieures, donc de réaliser des économies d'énergie. Ces analyses n'ont pas l'objet d'études précises avec RTE dans le cadre des travaux dont rend compte le présent rapport.

RTE n'a pas mené d'analyse complémentaire sur cette question et s'est donc basé sur les résultats de l'avis de l'ADEME.

3.3.2 Effacement résidentiel sur le chauffage électrique – résultats des expérimentations

Pour l'évaluation des économies d'énergie et du report associés aux effacements de consommation, des conventions de tests ont été conclues avec des opérateurs d'effacement volontaires selon les principes exposés dans les règles NEBEF, afin notamment de disposer de données issues d'expérimentations pratiques, ou avec toute autre entité souhaitant proposer des méthodes d'évaluation du report de consommation (p. ex : les gestionnaires de réseau de distribution).

Par ces expérimentations, RTE s'est inscrit résolument dans la préparation de la déclinaison du nouveau cadre législatif. Dans ce contexte, RTE a cherché à disposer des résultats les plus fiables et comparables possibles pour déterminer si cette catégorie d'effacements conduisait à des économies d'énergie significatives et proposer une évaluation du taux d'économie d'énergie (ou une plage de taux).

La liste des expérimentations menées figurent au paragraphe 2.1 du rapport.

En cohérence avec les éléments présentés dans la partie 2, RTE a souhaité définir un cadre méthodologique d'évaluation du report applicable à toutes les expérimentations afin de pouvoir plus facilement comparer les résultats et la précision des méthodes d'évaluation.

Ce cadre méthodologique concerne notamment les traitements préalables des données issues de l'expérimentation, la convention de mesure du taux de report, l'estimation de l'incertitude associée aux résultats présentés (pouvant être lié à l'échantillon retenu pour les tests ou à la méthode d'évaluation en elle-même). En théorie, la définition de ce cadre aurait dû précéder la mise au point des protocoles expérimentaux par les opérateurs en lien avec RTE ; néanmoins, vu les délais, le cadre a dû être appliqué *a posteriori* à des protocoles hétérogènes définis directement par les opérateurs d'effacement selon la logique de l'expérimentation menée, et donc antérieurement au démarrage de ces travaux. Il s'agit d'une limite des résultats présentés dans ce rapport.

Lorsque cela a été possible, le cadre méthodologique a été appliqué directement aux méthodes proposées par les parties prenantes. Dans certains cas, RTE a également été amené à proposer des variantes aux méthodes initialement décrites par les opérateurs.

3. VOLTALIS, opérateur d'effacement diffus ayant équipé plus de 100 000 sites, a mis à disposition deux groupes de 1 400 foyers adhérents situés dans l'ouest de la France entre janvier 2012 et avril 2013. Les économies d'énergies ont été mesurées entre un groupe sur lequel des effacements étaient réalisés et l'autre groupe « témoin ».

Les paragraphes ci-dessous présentent une vision synthétique des résultats obtenus. Le compte-rendu complet et détaillé des tests et des analyses effectuées, ainsi que les observations formulées par les parties prenantes et recueillies suite à la procédure contradictoire prévue par les conventions, figurent dans les annexes 1 à 4 du rapport. Dans un souci de lisibilité et pour en faciliter la comparaison, chaque annexe est rédigée avec un plan identique : (i) la description du protocole de tests, (ii) la description de la méthode d'évaluation du report, (iii) la présentation des résultats obtenus complétée par une évaluation de l'incertitude associée, (iv) les observations des parties prenantes.

3.3.2.1 Caractéristiques des expérimentations

Les différentes expérimentations ont permis de tester 5 méthodes d'évaluation du taux d'économie d'énergie :

- *Une méthode statistique de prévision calée sur l'historique de type GAM (modèle additif généralisé) proposée par RTE*

  La méthode GAM est un modèle statistique du domaine public permettant de réaliser une prévision à partir d'une liste de variables explicatives présélectionnées et d'une somme de fonctions polynomiales. RTE a proposé les variables explicatives, puis estimé la consommation de référence avec le modèle GAM en paramétrant le modèle sur les périodes pendant lesquelles aucun effacement n'a été réalisé. Pendant les périodes d'effacement et d'évaluation du report, la comparaison entre la courbe de référence et la consommation réalisée des sites participant aux effacements permet une évaluation du taux d'économie d'énergie pour l'ensemble de sites étudié et sur la période considérée.

  La méthode GAM a été appliquée à des effacements réalisés par VOLTALIS dans le cadre du mécanisme d'ajustement entre le 1er novembre 2011 et le 31 mars 2012.

- *Une méthode fondée sur l'utilisation de groupes miroirs – la méthode TED (témoin éprouvé dynamique) – proposée par VOLTALIS*

  Pendant qu'un groupe de consommateurs contribue à des effacements, un autre groupe de sites dit témoin, dont la comparabilité est éprouvée de façon dynamique, permet de constituer la courbe de référence servant à l'évaluation du report du premier groupe.

  Suite aux analyses menées conjointement entre VOLTALIS et RTE, RTE a proposé une autre méthode, présentée comme une variante de la méthode TED dont les principes et les résultats sont également décrits en annexe.

  La méthode TED et la variante proposée par RTE ont été appliquées à une expérimentation menée par VOLTALIS. Cette expérimentation repose sur des effacements réalisés début 2014 et impliquant 45000 logements selon un protocole de test prédéfini par VOLTALIS.

- *Une méthode statistique de prévision calée sur l'historique de type LASSO proposée par EDF*

  La méthode de régression de LASSO est une méthode statistique de prévision, qui s'applique dans le cas où il existe de nombreuses variables explicatives, potentiellement corrélées entre elles. La méthode LASSO permet de sélectionner les variables les plus pertinentes et d'estimer les paramètres associés. EDF a proposé les variables explicatives, puis estimé la consommation de référence avec le modèle LASSO en paramétrant le modèle sur les périodes pendant lesquelles aucun effacement n'a été réalisé. Pendant les périodes d'effacement et d'évaluation du report, la comparaison entre la courbe de référence et la consommation réalisée des sites participant aux effacements permet une évaluation du taux d'économie d'énergie.

- *Une méthode fondée sur l'utilisation de panels proposée par ERDF*[4]

  Pendant les périodes d'effacement et d'estimation du report, la consommation de référence est estimée à partir de la consommation d'un panel de sites représentatifs et ne participant aux effacements. Des pondérations appliquées aux sites composant le panel miroir sont évaluées de manière dynamique sur des périodes d'apprentissage (périodes sans effacement) afin de rendre la consommation du panel représentative à chaque instant de celles des logements participants aux effacements, plus précisément de

4. Les régimes de propriété intellectuelle applicables sont détaillés dans l'annexe n°4 : EDF a développé un procédé visant à estimer le volume de consommation électrique effacée lors de périodes d'effacement diffus qui a fait l'objet d'une demande de brevet, ERDF a mis au point des modalités d'application de la méthode proposée par EDF pour les travaux réalisés dans le cadre de ce rapport. Dans le cadre des travaux restitués dans le rapport, ERDF a précisé que pour faciliter une utilisation libre de la méthode en France par l'ensemble des acteurs, EDF et ERDF étaient convenus d'une cession par EDF à ERDF de la demande de brevet France, ERDF s'engageant par ailleurs à permettre l'utilisation libre de la méthode par l'ensemble des acteurs en France.

la consommation qui aurait pu être observée sans action de l'opérateur d'effacement.

La méthode LASSO et la méthode fondée sur l'utilisation de panels ont été appliquées sur les mêmes effacements réalisés par EDF durant les hivers 2012-2013 et 2013-2014 dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance » et du programme régional ENBRIN (Energie Bretagne innovation). La méthode fondée sur l'utilisation de panels a également été appliquée aux effacements réalisés par EDF durant l'hiver 2014-2015 dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance » et du programme régional ENBRIN (Energie Bretagne innovation).

Tableau 2 – Caractéristiques des expérimentations

Opérateur d'effacement	Méthode testée (partie la proposant)	Cadre de réalisation des effacements	Période de réalisation des effacements	Nombre d'effacements réalisés	Caractéristiques des effacements	Durée minimale pour l'observation du report	Nombre de consommateurs contribuant aux effacements
VOLTALIS	TED (VOLTALIS)	Protocole spécifique	Du 29/01/2014 au 04/02/2014	24 blocs	3 fois 10 minutes (20 minutes de repos entre chaque effacement)	22 heures	45 000 sites répartis en 4 paires de groupes
VOLTALIS	Variante de TED (RTE)	Protocole spécifique	Du 29/01/2014 au 04/02/2014	24 blocs	3 fois 10 minutes (20 minutes de repos entre chaque effacement)	22 heures	45 000 sites répartis en 4 paires de groupes
VOLTALIS	GAM (RTE)	Mécanisme d'ajustement et tests spécifiques	Du 01/11/2011 au 31/03/2012	377 effacements	Effacements de durée inférieure à 30 minutes	Pas de durée minimale	Quelques dizaines de milliers
EDF	LASSO (EDF)	Protocole spécifique (programme régional « Une Bretagne d'avance »)	Hiver 2012-2013	20 jours d'effacement	Pour chaque jour d'effacement, 2 fois 2 heures (9-11 h et 18-20 h)	7 heures pour l'effacement du matin, 13 heures pour l'effacement du soir	244 sites localisés en Bretagne (maisons individuelles)
EDF	LASSO (EDF)	Protocole spécifique (programme régional « Une Bretagne d'avance »)	Hiver 2013-2014	13 jours d'effacement	Pour chaque jour d'effacement, 16 fois 10 minutes entre 6 et 22 heures (20 minutes de repos entre deux effacements de dix minutes)	8 heures	3 groupes de 115, 116 et 109 sites localisés en Bretagne (maisons individuelles)
EDF	Panels (EDF et ERDF)	Protocole spécifique (programme régional « Une Bretagne d'avance »)	Hiver 2012-2013	20 jours d'effacement	Pour chaque jour d'effacement, 2 fois 2 heure (9-11 h et 18-20 h)	7 heures pour l l'effacement du matin, 13 heures pour l'effacement du soir	244 sites localisés en Bretagne (maisons individuelles)
EDF	Panels (EDF et ERDF)	Protocole spécifique (programme régional « Une Bretagne d'avance »)	Hiver 2013-2014 et 2014-2015	13 et 16 jours d'effacement	Pour chaque jour d'effacement, 16 fois 10 minutes entre 6 et 22 heures (20 minutes de repos entre deux effacements de dix minutes)	8 heures	277 sites localisés en Bretagne (maisons individuelles)

Une campagne de tests avec DIRECT ÉNERGIE a également été envisagée en se basant sur une les effacements réalisés dans le cadre du projet Modelec. Cependant, l'échantillon statistique envoyé initialement ne permettait pas de réaliser des analyses statistiques suffisamment fiables. Cette campagne n'a donc pas pu être menée à son terme dans le cadre de ce rapport, et pourra faire l'objet d'études complémentaires.

Les conditions de réalisation des différents tests sont précisées dans le tableau ci-contre.

Des différences notables entre ces expérimentations sont susceptibles de fortement conditionner la portée des résultats obtenus. Elles concernent les éléments suivants :

- *Le nombre de sites impliqués :* seules les évaluations réalisées à partir des méthodes TED et GAM impliquent un nombre substantiel de sites (plusieurs dizaines de milliers). Les résultats obtenus sont ainsi plus robustes d'un point de vue statistique, et plus représentatifs du parc de logements susceptibles de réaliser des effacements. En revanche, les caractéristiques des logements concernés demeurent mal connues (l'expérimentation menée ne cherchait pas à évaluer l'impact du type de logement participant aux effacements).
- *Le nombre d'effacements réalisés :* seule l'évaluation à partir de la méthode GAM repose sur un grand nombre d'effacements (377), ce qui permet d'obtenir une meilleure représentativité statistique du résultat (notamment dans la mesure où les taux obtenus demeurent très variables d'un effacement à l'autre) ;
- *Le protocole retenu pour les effacements :* seule l'évaluation réalisée à partir de la méthode TED repose sur un schéma spécifiquement conçu pour évaluer le report et prédéfini, avec notamment un effacement activé toutes les 48 heures sur un groupe de sites. Ce schéma d'activation régulier permet d'évaluer un taux de report associé à un effacement mais également de disposer d'une forme et d'une durée précises. Dans les autres cas, seul un taux global peut être constaté. En effet, le taux observé est le résultat de la séquence passée des effacements, sans que l'on puisse être en mesure de caractériser plus précisément le taux, la forme et la durée du report associé à chaque effacement de manière isolée. À titre d'exemple, si l'on se place 8 heures après le dernier effacement, le taux de report constaté correspondra bien à un taux à 8 heures pour le dernier effacement mais à un taux à 8 + N heures pour le premier effacement.

3.3.2.2 Conventions de calcul et analyses de sensibilité

Les différents tests réalisés ont permis une évaluation du taux moyen de report ou d'économie d'énergie pour un consommateur qui participe à des effacements. RTE propose le calcul de 2 taux reposant sur 2 conventions différentes de délimitation de l'effacement présentées dans la partie 1 du rapport :

- *Une convention fondée sur les baisses de consommation constatées :* l'effacement du site correspond alors à l'intégralité de la diminution de consommation constatée (par rapport à la consommation « normale » du consommateur) et le report de consommation comme l'intégralité de la surconsommation (là encore, par rapport à sa consommation normale).
- *Une convention fondée sur les ordres d'effacement envoyés par l'opérateur d'effacement :* sont alors comptabilisés comme effacements les volumes de sous-consommation observés durant la période de l'ordre d'effacement, et comme économie d'énergie ou comme report de consommation les phénomènes de sous- ou sur-consommation intervenant après l'achèvement de l'ordre d'effacement, et non au moment du démarrage effectif du phénomène de surconsommation par rapport à la consommation « normale » du site.

Comme indiqué dans le Tableau 3, en fonction du protocole retenu pour les effacements, il peut être possible ou non d'évaluer la forme du report. Dans ce cas, les résultats intègrent des taux à différentes échéances temporelles (taux de report observé 8 heures après la fin de l'effacement, 12 heures après, etc.). Dans les autres cas, seul un taux global est évalué, il correspond au report global pouvant être estimé à partir des données issues de l'expérimentation.

Concernant l'incertitude associée aux résultats, lorsqu'ils sont disponibles les éléments suivants sont présentés (cf. chapitre 2) :

- *La précision de la courbe de référence (il s'agit des indicateurs de type MAPE ou MPE définis au chapitre 2) :* les indicateurs de précision de la courbe de référence sont calculés en comparant la courbe de référence et la consommation réelle des sites sur des périodes de repos choisies au hasard et ayant la même structure que les périodes d'effacement et d'observation du report. Plus les valeurs sont faibles et peu dispersées, meilleure est la précision de la courbe de référence sur ces périodes. La précision

de l'évaluation du report n'est pas uniquement liée à la précision de la courbe de référence, cependant celle-ci constitue une bonne indication relative à cette évaluation.

- *Le pseudo-report évalué sur des périodes de repos :* le calcul du pseudo-report consiste à évaluer un taux de report associé à des effacements fictifs sur des périodes pendant lesquelles aucun effacement n'a été réalisé. C'est donc une forme de placebo : le taux attendu est nul, puisqu'aucun effacement n'a été réalisé. La dispersion du pseudo-report donne une bonne indication relative à l'intervalle de confiance associé à l'évaluation du report, sous réserve de disposer d'un nombre suffisant de périodes de repos. Les périodes de repos retenus pour le pseudo-report sont les mêmes que celles utilisées pour évaluer la précision de la courbe de référence.
- *La sensibilité des résultats au choix initial de l'échantillon des sites participants aux effacements :* cette sensibilité est évaluée par bootstrap (multitude de ré-échantillonnages des sites obtenus par tirages aléatoires successifs avec remise).

3.3.2.3 Synthèse des résultats

Pour rappel, une présentation détaillée des résultats obtenus ainsi que des analyses associées (point de vue de RTE et point de vue des parties prenantes aux tests) figurent dans les annexes du rapport.

Concernant les travaux menés avec VOLTALIS, les écarts entre les résultats obtenus avec la méthode TED initialement proposée par VOLTALIS et avec la variante proposée par RTE résulte des évolutions suivantes :

- la suppression du calage à 8 heures. VOLTALIS a proposé une variante de TED avec un calage à 18 heures qui aboutit à un taux de report de 19,5%, le taux initial avec un calage à 8 heures étant de 5,5%. RTE a proposé une suppression définitive du calage, dans le cadre d'une variante de la méthode TED, en évaluant le report sur la base de la consommation moyenne des sites participant aux effacements et des groupes témoins ;
- la suppression de certains traitements de données proposés par VOLTALIS, ces traitements visant à ne retenir que des sites susceptibles de participer aux effacements, et à remplacer les valeurs manquantes isolées ;
- le calcul des taux selon les deux conventions de mesure possibles.

Tous ces éléments sont détaillés dans l'annexe relative à la méthode TED, avec les analyses de VOLTALIS et de RTE en cas de divergence résiduelle. Au final, VOLTALIS aboutit à un taux à 18 heures de 19,5% avec la convention de mesure fondée sur les ordres d'effacement, et RTE à un taux de 46% à 22 heures avec la convention de mesure fondée sur les baisses de consommation constatées.

À ce stade, RTE considère que les travaux ont permis d'établir de façon robuste une connaissance du report et de l'économie d'énergie induits par les effacements diffus étudiés. Si des divergences méthodologiques sont apparues au cours des travaux entre RTE et VOLTALIS, qui n'ont pu être toutes résolues (du moins avant l'échéance du présent rapport), il en résulte pour les résultats chiffrés des différences de deux natures distinctes :

- de façon minoritaire : des différences de traitement qui se traduisent par un chiffrage relativement convergent, puisqu'il aboutit, toutes différences résiduelles prises en considération, à une fourchette de 16 à 30% pour le taux de report résultant de la délimitation des volumes d'effacement selon les ordres d'effacement (voir annexe 1) ;
- de façon principale, une différence de chiffrage selon le choix de l'une ou l'autre des délimitations des volumes d'effacement, et donc du taux correspondant. Ainsi, par exemple, au chiffre de 30% cité ci-dessus pour le taux de report fondé sur les ordres d'effacement correspond, toutes choses égales par ailleurs, le chiffre de 46,4% pour le taux fondé sur les baisses de consommation constatées au delà des ordres d'effacement. Cette différence importante ne tient pas au phénomène physique de report étudié, qui est bien le même dans les deux cas, mais à la convention adoptée pour rendre compte de l'effacement lui-même.

Concernant les travaux avec EDF et ERDF, RTE souligne que, sur un même échantillon d'effacements, il existe des différences importantes entre les taux de report obtenus mais cohérentes avec les indicateurs de précision associés à chacune de ces méthodes. À ce stade des analyses, RTE considère que les méthodes LASSO et la méthode des panels sont des méthodes d'évaluation fiables mais nécessitent d'être approfondies et d'être testées sur un plus grand échantillon statistique.

Tableau 3 – Synthèse des résultats issus des expérimentations

Méthode	Résultats		Estimation de l'incertitude associée aux résultats	
	Taux de report moyen fondé sur les ordres d'effacement pour un site contribuant aux effacements	Taux de report moyen fondé sur les baisses de consommation constatées pour un site contribuant aux effacements	Précision de la courbe de référence (valeur centrale et intervalle de confiance à 90 %)	Pseudo-report (valeur centrale et intervalle de confiance à 90 %)
Méthode TED (méthode initialement proposée par VOLTALIS)	Report à 8 h 5,5 % Taux à 18 h 19,5 %	Non évalué	MAPE 1,11 % [0,98 % ; 1,26 %] MPE 0 % [-0,29 % ; 0,28 %]	Pseudo-report à 8 h 0,20 % [-4,59 % ; 4,66 %]
Variante de la méthode TED proposée par RTE	Report à 8 h 8 % Report à 22 h 30 %	Report à 8 h 30 % Report à 22 h 46 %	MAPE 0,99 % [0,91 % ; 1,08 %] MPE 0 % [-0,26 % ; 0,23 %]	Pseudo-report à 8 h 0,20 % [-4,92 % ; 4,42 %]
Méthode GAM, hiver 2011-2012	Report (***) 58 % [30 % ; 91 %] (****)		Non évalué	Non évalué
Méthode LASSO, hiver 2012-2013	Report (*) 57 %	Report (*) 59 %	MAPE 6,50 % [5,60 % ; 7,70 %] MPE 0,8 % [-1,30 % ; 3,20 %]	Pseudo-report -1,70 % [-16,90 % ; 15,50 %]
Méthode des panels, hiver 2012-2013	Report (*) 72 %	Report (*) 73 %	Évaluation prévue dans la suite des travaux	Non évalué
Méthode LASSO, hiver 2013-2014	Report (**) 59 %	Report (*) 61 %	MAPE 8,50 % [7,20 % ; 9,90 %] MPE 1,30 % [-2,10 %; 4,50 %]	Pseudo-report -1,10 % [-20,6 % ; 19,6 %]
Méthode des panels, hiver 2013-2014	Report (**) 42 %	Report (*) 48 %	MAPE 9,15 % [8,43 % ; 10,21 %] MPE 0,35 % [-2,22 % ; 3,02 %]	Pseudo-report 5,3 % [-8,00 % ; 13,60 %]
Méthode des panels, hiver 2014-2015	Report (**) 57 %	Report (*) 61 %	Évaluation prévue dans la suite des travaux	Non évalué

(*) Le taux présenté ici correspond au report observé suite à tous les effacements réalisés sur une plage de 13 heures consécutives aux effacements.

(**) Le taux présenté ici correspond au report observé suite à tous les effacements réalisés sur une plage de 8 heures consécutives aux effacements.

(***)Le taux présenté ici correspond au report observé suite à tous les effacements retenus selon cette méthode, sur une plage de 10 heures consécutives aux effacements.

(****) Intervalle de confiance obtenu par bootstrap sur les effacements réalisés, ainsi que sur les plages de repos servant à calibrer le modèle.

3.3.2.4 Éléments d'analyse et d'interprétation des résultats

En premier lieu, l'évaluation du taux de report pose des enjeux particuliers de précision des méthodes statistiques utilisées.

1) **L'évaluation du report de consommation nécessite une grande précision du point de vue statistique.** Le report associé aux effacements de chauffage électrique s'établit sur une longue durée, bien plus longue que celle de l'effacement lui-même ; durant la période du report, la consommation effective et la courbe de référence sont susceptibles d'être très proches ; une erreur faible sur la courbe de référence peut entraîner une importante erreur en matière d'évaluation du report. Il est donc nécessaire de disposer d'une courbe de référence d'une très grande précision, ce qui est d'autant plus difficile que le report est long et que la valeur de la courbe de référence durant la période d'effacement et de report constitue par construction une valeur non observable. Ainsi, le nombre de sites impliqués dans l'évaluation doit être important, tout comme le nombre d'effacements réalisés. Sans ces deux conditions, la mesure obtenue risque d'être peu représentative. Sur ce plan, c'est l'expérimentation menée avec VOLTALIS, reposant sur 45000 sites de consommation, qui donne les résultats les plus fiables du point de vue statistique, et ceci quels que soient les indicateurs statistiques utilisés. Cela n'invalide pas l'intérêt des autres méthodes testées, mais les expérimentations menées avec EDF et ERDF doivent être poursuivies sur un périmètre plus large afin de réduire les marges d'incertitude associées aux résultats.

2) **Les travaux menés permettent également d'évaluer deux méthodes de manière simultanée sur les mêmes types d'effacement et donc de mettre en évidence l'importance des indicateurs statistiques relatifs à l'incertitude associée aux méthodes d'évaluation.** Les travaux menés avec EDF d'une part, avec EDF et ERDF d'autre part, permettent par exemple de comparer l'utilisation de deux méthodes distinctes sur les mêmes effacements : le taux de report peut alors varier d'une quinzaine de points selon les méthodes, les différences entre les taux observés dans les deux méthodes peuvent être de signes différents. Ces différences significatives sont malgré tout cohérentes avec les plages de validité des résultats et les marges d'incertitude associées à chaque méthode (les résultats se situent dans la plage [48-73 %] de taux de report).

En second lieu, les expérimentations mettent tout en évidence une forte sensibilité des résultats

3) Les analyses sont **très sensibles aux définitions retenues pour mesurer le phénomène de report** (conventions de calcul et périmètre d'évaluation), ce qui renforce l'importance des précautions méthodologiques présentées supra. L'utilisation de conventions de calcul différentes peut faire varier le résultat de l'ordre de 25 points le taux de report (expérimentation menée avec VOLTALIS), les modalités d'agrégation peuvent modifier ce taux d'un facteur 2 (expérimentations menées avec EDF et ERDF).

4) **Les analyses sont par ailleurs sensibles aux paramètres de calcul proprement dits :** à titre d'exemple, des choix différents en matière de traitement des valeurs manquantes peuvent entraîner une influence de l'ordre de 10 points sur le taux de report. Dans les travaux les plus avancés, ces choix ont été identifiés et discutés, et de tels ordres de grandeur mis en évidence – et un travail de même nature devra être réalisé pour toutes les autres méthodes à l'avenir. Toutefois, certaines investigations n'ont pu encore être menées jusqu'à leur terme dans les délais impartis par la publication du présent rapport, lequel présente donc les différentes approches envisageables sans conclure définitivement sur la prééminence de l'une. Un intervalle de confiance d'une dizaine de points sur les chiffres présentés peut donc sembler légitime à ce stade.

En troisième lieu, les expérimentations mettent toutes en évidence l'existence d'un report de consommation, d'une durée plus importante qu'initialement imaginé .

5) Dans tous les cas de figure étudiés, un **report de consommation est systématiquement mis en évidence. L'existence de ce report de consommation est reconnue par les opérateurs d'effacement.** Site par site, ce phénomène peut prendre des formes différentes : le redémarrage d'un certain nombre de sites peut être différé de plusieurs minutes voire plusieurs heures après l'arrêt de l'ordre d'effacement (voir point n° 9 ci-dessous).

6) Les expérimentations convergent pour mettre en avant un **report d'une durée longue,** supérieure à ce qui était envisagé jusqu'alors. Le report semble ainsi attesté sur **au moins une vingtaine d'heures.** Les résultats obtenus avec la méthode des panels

et avec la méthode LASSO montrent que le report n'est pas terminé 8 heures après la fin des effacements. EDF considère que le report se poursuit après 24 heures. L'expérimentation menée avec VOLTALIS et la méthode TED atteste de l'existence d'un report *a minima* 18 heures après l'effacement, VOLTALIS considérant que le report est terminé à cette échéance tandis que RTE considère que les tests menés ne permettent pas de conclure en ce sens (c'est pour étudier le phénomène physique de report après 18 heures que RTE a proposé une variante de TED qui permet une évaluation sur 22 heures, les versions initiales conduisant par construction à tronquer le report 8 heures, puis 18 heures après la fin de l''effacement). Sur la base des 5 expérimentations menées, RTE estime donc qu'il n'est pas possible de conclure que le report est achevé 24h après la fin de l''effacement. Dans tous les cas, ces résultats valident le fait que toute étude sur les effacements doit porter sur une durée d'observation longue.

7) Le report étant diffus et de très longue durée, il est donc difficilement observable. Les effacements réalisés dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance » menée par EDF ont été en grande partie activés sur des jours consécutifs, notamment lors des hivers 2012-2013 et 2013-2014. Le faible intervalle entre deux effacements ne permet pas une observation du report « effacement par effacement » associé à sa forme, sa durée ; seul un taux de report cumulé pour *l'ensemble* des effacements réalisés peut être observé. Dans le cadre de la méthode TED, VOLTALIS a mis en place un protocole qui garantit une période d'observation de 22 heures après chaque effacement.

8) La quasi-totalité des cas étudiés (tous sauf une configuration d'effacement avec la méthode des panels) montrent également que, 24 h après la fin de l'effacement, le taux de report est inférieur à 100 % : le rattrapage de consommation ne semble donc pas intégral sur 24 h, et **il est impossible de considérer le report comme total ou proche de l'être sur une journée. À cette échéance, des économies d'énergie semblent donc avoir été réalisées** (sans préjudice d'une éventuelle poursuite du phénomène de rattrapage de consommation au-delà de 24 h).

9) Dans le cas de coupures brèves effectuées durant des durées courtes (3 fois 10 minutes), **de nombreux sites présentent un comportement particulier, dit avec « reprise différée ». L'existence de sites à reprise différée a un impact significatif sur le taux de report.** Concrètement, les sites en question ne retrouvent leurs niveaux de consommation initiaux que plusieurs heures après la fin de l'effacement. Ce phénomène est très marqué pour certains effacements, alors que d'autres au contraire commencent à rattraper leur consommation dès que les ordres s'arrêtent. RTE a cherché à déterminer des facteurs explicatifs structurels, basés sur la nature des sites de consommation ou le type de chauffage mais il semble qu'un site puisse être alternativement caractérisé par un redémarrage lent ou rapide au gré des effacements. Une autre explication pourrait être liée au système de régulation des sites, mais cette hypothèse n'a pas pu être confirmée dans le cadre des tests réalisés. Enfin, selon une autre conjecture, ce phénomène pourrait être attribué à des transferts d'énergie inter-sites, mais cette hypothèse n'a pas pu être établie ni même testée dans le cadre des travaux réalisés. De manière générale, le fait que les sites aient des comportements hétérogènes est de nature à perturber l'évaluation des taux de report et d'économie d'énergie, en particulier pour les effacements courts. L'existence des sites à reprise différée permet notamment d'expliquer les taux de report globaux faibles dans le cadre de l'expérimentation menée avec VOLTALIS, plus particulièrement s'agissant des taux évalués avec la convention fondée sur les ordres d'effacement. RTE estime souhaitable que les études présentées dans ce rapport soient prolongées par d'autres travaux permettant d'expliquer ce phénomène de « reprise différée », et notamment d'examiner les hypothèses précédemment mentionnées (modes de régulation des chauffages, possibilité de transferts d'énergie inter-sites dans les immeubles par exemple, etc.).

S'agissant de la fixation d'un taux normatif pour la catégorie de l'effacement des appareils de chauffage électrique dans le secteur résidentiel, les travaux réalisés à ce stade conduisent à envisager un taux d'économie d'énergie mesuré de 50 % à 24 h établi selon la convention de mesure basée sur les baisses de consommation constatées.

10) Les évaluations ont été réalisées sur la base d'effacements réalisés par les opérateurs avant la signature des conventions et selon des protocoles d'effacement qui leur sont propres. À ce jour, il s'agit des seuls éléments expérimentaux portés à la connaissance de RTE et permettant de réaliser une évaluation empirique du taux de report.

11) La définition d'un protocole de test unique et appliqué sur des effacements réalisés a posteriori a été envisagée par RTE mais n'aurait pas permis de disposer d'éléments d'analyse dans les délais prévus pour la déclinaison de l'article 168 de la loi relative à la transition énergétique : cette option n'a donc pas pu être retenue. Dans l'optique de garantir le caractère comparable de différents résultats et d'alimenter utilement le débat public, RTE a proposé d'appliquer une trame d'analyse unique à l'ensemble des effacements et des méthodes d'évaluation faisant l'objet d'une convention de tests.

Les résultats initiaux faisaient l'objet d'une forte dispersion, balayant quasiment tout le spectre des résultats possibles entre 0 % et 100 %. **L'utilisation de la trame d'analyse commune pour toutes les évaluations – ou l'établissement de variantes permettant d'appliquer ce cadre méthodologique – a permis de réduire cette dispersion :**

a. avec la convention de calcul fondée sur les ordres d'effacement, les ordres de grandeur de taux de report sont compris entre 20 % et 70 %.
b. avec la convention de calcul fondée sur les baisses de consommation constatées, les ordres de grandeur de taux de report sont compris entre 45 % et 75 %.

12) La fixation d'un taux unique pour la catégorie des effacements résidentiels des appareils de chauffage électrique interroge, comme dans le secteur industriel, sur les avantages et inconvénients d'un traitement normatif (les modes opératoires des opérateurs d'effacement comme les circonstances de l'effacement exercent une influence sur le taux atteint). Retenir une approche normative pour décliner le nouveau cadre législatif nécessite d'extrapoler des différents résultats expérimentaux en une réalité générale qui ne reflétera pas fidèlement toutes les situations particulières rencontrées. Il semble cependant que, dans le cadre de la déclinaison des modalités relatives au régime de versement dérogatoire prévu par la loi, l'élaboration d'un taux d'économie d'énergie normatif par catégorie soit envisagée. C'est par conséquent dans ce cadre de déclinaison de l'article 168 de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte – et dans ce cadre uniquement – que valent les conclusions suivantes.

13) Pour proposer un taux normatif pour les effacements du chauffage électrique dans le secteur résidentiel, et dans la mesure où des choix devraient intervenir à ce stade et sur la base des résultats obtenus jusqu'ici, RTE propose de retenir l'approche suivante :

a. En ce qui concerne le périmètre d'évaluation, **RTE propose de retenir le taux unitaire basé sur un « client moyen »,** qui semble correspondre à la fois à l'esprit et à la lettre de la loi.
b. En ce qui concerne la convention de comptabilisation de l'effacement, **RTE propose de retenir celle fondée sur les baisses de consommation constatées.** Cette dernière permet de saisir l'intégralité du phénomène physique « vu du système » en s'affranchissant de toute donnée basée sur les ordres d'effacement (peu importe alors les modalités d'action de l'opérateur d'effacement, c'est son action effective sur le système électrique qui est évaluée).
c. En ce qui concerne le traitement des « sites avec reprise différée », RTE considère légitime de les intégrer à l'analyse. Ceci conduit à **prendre en compte les effets de ces comportements *a priori* atypiques sur l'évaluation du taux de report.**
d. En ce qui concerne les méthodes et conformément aux remarques exprimées dans le cadre des procédures contradictoires, RTE choisit de n'exclure aucun résultat malgré l'hétérogénéité statistique. En revanche, RTE considère non pertinents les résultats obtenus avec la méthode TED sur une durée d'observation de 8 heures (le calage à 8 h ne permet pas d'évaluer le report sur une durée d'observation suffisante), ainsi que les estimations les plus élevées obtenus avec la méthode des panels (le protocole ne permet pas d'identifier le report associé à un seul effacement mais à une séquence). **Ceci conduit à considérer la plage [45-75 %] pour le report de consommation à 24 h, sur la base de la convention fondée sur les baisses de consommation constatées.**
e. Enfin, au sein de cette fourchette, **RTE propose de retenir la valeur de 50 %,** car elle est cohérente avec l'expérimentation associée, à ce stade, aux meilleurs résultats statistiques et est compatible avec les autres expérimentations.

14) Chacune de ces étapes de raisonnement peut faire l'objet de discussions. Lors du débat ayant suivi la présentation des résultats au sein du CURTE, certains acteurs ont mis en avant d'autres lignes d'interprétation. Les principaux éléments de variations dans les analyses sont les suivants :

a. Au lieu de considérer tous les résultats expérimentaux, seuls ceux présentant les indicateurs statistiques les plus élevés pourraient être privilégiés. Cela conduirait à considérer principalement les résultats obtenus dans le cadre des travaux menés avec VOLTALIS, qui donnent des résultats compris entre 20 et 45 % selon l'une ou l'autre des conventions.
b. Au lieu d'utiliser la convention fondée sur les baisses de consommation constatées, celle fondée sur les ordres d'effacement pourrait être privilégiée (par exemple au motif que les méthodes actuelles de contrôle du réalisé ne permettraient pas de mesurer de manière performante ce redémarrage lent). Cette option conduirait non seulement à considérer des taux plus faibles (de l'ordre de 20-30 % pour l'expérimentation basée sur le plus grand nombre de sites) mais aussi à constater la plus grande diversité apparente des valeurs issues des différentes expérimentations (les résultats obtenus avec EDF et ERDF demeurent dans une grande mesure stables même en changeant de convention de mesure).
c. Au lieu de chercher à caractériser les économies d'énergie réalisées au niveau d'un client moyen, prendre en compte des taux évalués à l'échelle d'un périmètre agrégé. Cette option entraîne un effet baissier sur les taux de report calculés selon les modes d'agrégation, et met l'accent sur la difficulté à rendre compte du phénomène par des valeurs normatives.
d. Au lieu d'intégrer les sites à reprise différé au périmètre de l'analyse, ceux-ci pourraient être exclus au motif que les effets potentiels sur les sites adjacents ne sont pas pris en compte ou que l'horizon d'observation ne permet pas alors de prendre la mesure de tout le phénomène de report de consommation. Les résultats seraient alors réinterprétés autour des valeurs les plus élevées (de l'ordre de 75 % de report sur 24 h).
e. Au lieu de considérer les variantes proposées par RTE (dans le cadre de l'expérimentation menée avec VOLTALIS), la méthode initiale pourrait être retenue au motif que les nouveaux traitements introduits par RTE (suppression du calage, passage en client moyen, suppression des traitements de données) pourraient aboutir à des erreurs dont les conséquences n'ont pas encore été pleinement évaluées et qui pourraient justifier des investigations techniques complémentaires. Ceci pourrait conduire à valider un taux de 20 % plutôt que de 30 %, exprimé selon la convention des ordres d'effacement, et à un écart du même ordre sur la convention fondée sur les effacements constatés.

Enfin, cette évaluation générique et les enseignements que l'on peut en tirer sont associés à un périmètre de validité spécifique. Dans de nombreux cas, des prolongements sont d'ores et déjà identifiés (soit au sein des travaux déjà engagés, soit sur la base de résultats expérimentaux non encore exploités)

15) Les incertitudes associées à la définition des taux de report portent à ce stade encore sur le chiffre des dizaines. Mentionner des taux de report très précis n'a donc pas de sens. RTE invite donc à une grande prudence dans l'utilisation des résultats.

16) Les travaux restitués pourraient, tous, être prolongés. Dans le cadre des travaux menés avec VOLTALIS sur la méthode TED et ses variantes, des investigations techniques complémentaires pourraient conduire à privilégier ou au contraire à écarter certaines étapes de traitement des données (passage en client moyen, remplacement des valeurs manquantes). Dans le cadre des travaux menés avec EDF sur la méthode LASSO, les résultats de l'hiver 2014-2015 pourraient être exploités alors qu'ils ne le sont pas dans le présent rapport. Pour ce qui est des travaux menés avec ERDF sur la méthode des panels, les paramètres de sélection du panel pourraient être discutés, et la méthode pourrait être appliquée à d'autres expérimentations avec d'autres opérateurs d'effacement. Enfin, les nouvelles données reçues de DIRECT ÉNERGIE pourraient conduire à une évaluation, selon la méthode exposée dans le présent rapport, des effacements réalisés dans le cadre du projet Modélec. Les contraintes temporelles de déclinaison réglementaire du nouveau cadre législatif n'ont pas permis à ces prolongements d'être intégrés dans le rapport : les résultats présentés le sont ainsi sans préjudice des enseignements ultérieurs que ces analyses complémentaires permettraient d'acquérir.

17) Les résultats obtenus ont certes été analysés selon une méthode commune, mais celle-ci a été appliquée *a posteriori* à des protocoles et des expérimentations hétérogènes. Contrairement à ce que RTE avait proposé fin 2014, il n'a ainsi pas été possible de mettre en place un protocole unique permettant

de tester de manière spécifique, selon plusieurs méthodes, un même type d'effacement. Ceci pourrait être mis en œuvre à l'avenir, mais nécessite du temps.

18) Enfin, les opérateurs d'effacement exercent une influence, par leurs modes opératoires, sur les taux de report obtenus. Il est ainsi probable que des variations spécifiques à chaque opérateur puissent exister autour du chiffre avancé. À ce stade, il ne semble pas établi pour autant que ces variations puissent bouleverser les ordres de grandeur exposés ci-dessus.

3.3.3 Effacement résidentiel sur le chauffage électrique – simulations théoriques

Les résultats présentés dans cette section sont issus d'une collaboration entre RTE et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). L'objectif de ces travaux était de mieux appréhender les facteurs d'influence qui déterminent les volumes d'énergie reportée après un effacement en se basant sur des simulations théoriques et *in fine* de disposer d'une analyse plus fine de la forme et de la durée du report.

Il s'agit de travaux complémentaires à ceux réalisés dans le cadre des expérimentations (essentiellement concentrées sur les taux de report et d'économie d'énergie). Les simulations théoriques ont donc particulièrement vocation à alimenter la réflexion sur la prise en compte normative du report de consommation dans les règles de marché.

Les principaux facteurs d'influence identifiés avant le démarrage des travaux sont listés ci-dessous :

- la durée des effacements et le mode de pilotage (effacements de courte ou de longue durée, obtenus par interruption du chauffage ou par changement de la consigne de température, réalisés de manière continue ou par une succession de coupures brèves interrompues par des périodes pendant lesquelles les radiateurs peuvent à nouveau fonctionner, etc.) ;
- l'heure de la journée en lien avec une éventuelle programmation du chauffage (programmation du chauffage avec une température réduite la nuit par exemple…) ;
- les conditions climatiques (effacements réalisés pendant une semaine normale d'hiver ou pendant une semaine froide avec des températures plus froides que la normale) ;
- les caractéristiques du logement (maison ou appartement, surface, isolation, inertie thermique) ;
- les caractéristiques du système de chauffage électrique (caractéristiques des émetteurs, mode de régulation).

Au total, environ 2000 simulations ont été réalisées en croisant ces différents paramètres. Les simulations couvrent donc largement les configurations envisageables en termes de structure du bâtiment, de caractéristiques du système de chauffage, d'effacements réalisés. Elles permettent d'obtenir des ordres de grandeur et de déterminer les principaux facteurs d'influence. En revanche, elles ne permettent pas de conclure sur une vision moyenne précise du taux de report associé aux effacements de chauffage résidentiel : il faudrait pour cela être en mesure de caractériser finement le parc moyen de logements, et d'affecter ainsi un poids aux différents scénarios modélisés. Même si des éléments qualitatifs figurent dans la suite du document, ils ne sont pas suffisamment précis pour permettre une telle caractérisation.

Le CSTB a utilisé un logiciel simulant de manière dynamique les flux thermiques entre l'intérieur et l'extérieur (ou entre l'intérieur et les logements voisins pour les logements collectifs), l'équilibre thermique du logement, ainsi que le fonctionnement du système de chauffage sur la base des scénarios climatiques proposés par RTE. Les simulations intègrent également des hypothèses concernant l'occupation des logements. Chacune des simulations est représentative d'une semaine de consommation énergétique, avec deux scénarios, l'un avec un effacement en milieu de période, l'autre sans effacement. La comparaison entre les deux scénarios permet une estimation du report et des économies d'énergie associés aux effacements de consommation.

3.3.3.1 Notions fondamentales préalables

Avant de présenter les résultats issus des simulations, les paragraphes suivants proposent une caractérisation du parc de logements avec chauffage électrique, ainsi que quelques notions théoriques sur le lien entre effacement et économies d'énergie.

3.3.3.1.1 Caractéristiques de la consommation liée au chauffage électrique

Le parc résidentiel français compte 32 millions de logements, dont 28 millions de résidences principales pour une consommation énergétique annuelle finale de 494 TWh, l'électricité représentant environ un tiers. Le

poste le plus important de consommation énergétique correspond au chauffage, il représente environ 61 % des consommations en énergie finale tous usages confondus des résidences du parc existant[5].

La performance énergétique des logements a très fortement évolué au cours du temps avec une division par environ deux des besoins liés au chauffage rapportés au m² (de l'ordre de 200 KWh/m².an pour un logement en Ile-de-France construit avant 1974 et de l'ordre de 100 KWh/m².an pour un logement construit avant 2000), les réglementations thermiques, notamment la RT 2012, imposant des réductions encore beaucoup plus importantes des consommations de chauffage). Dans les chiffres-clés du bâtiment, édition de 2013, l'ADEME précise que les consommations moyennes unitaires de chauffage ont baissé de 58 % depuis 1973.

Cependant, le taux de renouvellement des logements est faible, l'essentiel de la consommation reste portée par des logements anciens : 66 % du parc de logements a été construit avant 1974. Ainsi, même si la performance énergétique des logements neufs est en très forte amélioration, l'essentiel de la consommation reste portée par des résidences anciennes et énergivores.

Le tableau 4 et la figure 15 précisent les parts de marché du chauffage électrique pour les différentes périodes de construction ainsi que, pour les logements chauffés à l'électricité, les répartitions en énergie consommée entre les logements anciens, construits avant 1975 et donc avant la mise en place des normes relatives à l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels, et les logements récents construits après 1975.

Figure 14 – Répartition du parc français par période de construction *(Source RAGE – Règles de l'art Grenelle Environnement – 2012)*

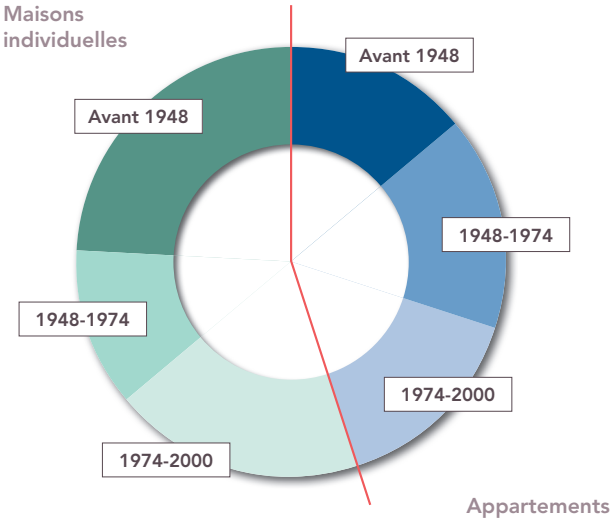


Figure 15 – Parts de marché du chauffage électrique *(Source : ADEME, chiffres clés du bâtiment, édition 2013)*

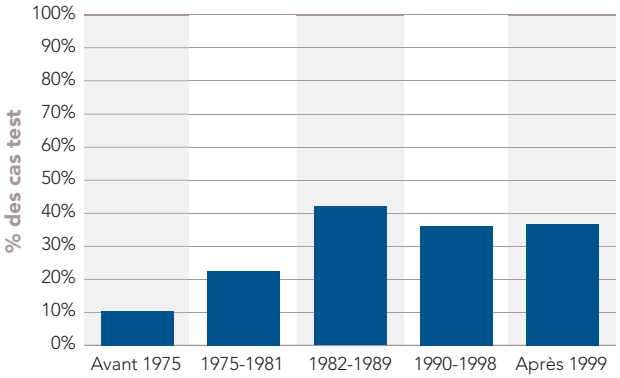


Tableau 4 – Répartition de la consommation de chauffage électrique par type de logement *(Source : ADEME, chiffres clés du bâtiment, édition 2013)*

		Consommation (TWh)	%
Maison individuelle	Ancien	10,7	24,1
	Récent	20,4	45,5
Logement collectif	Ancien	5,2	11,6
	Récent	8,2	18,4
Total		**44,5**	**100**

5. Chiffres clés du bâtiment, ADEME 2013.

Ces différents éléments permettent de mettre en évidence que, parmi l'ensemble des simulations réalisées, celles correspondant à des logements construits entre 1975 et 2000 devront plus particulièrement être prises en considération. L'essentiel de la consommation électrique liée au chauffage est porté par les maisons et les appartements construits dans les années 1980.

3.3.3.1.2 Caractéristiques des systèmes de chauffage électrique

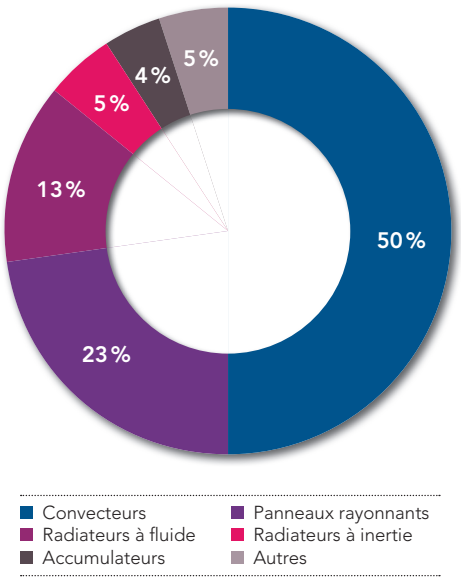
Un système de chauffage électrique est caractérisé d'une part par les émetteurs et d'autre part par le mode de régulation.

De manière schématique, trois grandes périodes peuvent être distinguées pour les appareils de chauffage électrique :

- années 1960-1970 : apparition des premiers appareils de chauffage électrique, convecteurs équipés d'une régulation mécanique et de sorties d'air verticales. Ces deux caractéristiques sont souvent associées à un inconfort thermique et à une surconsommation ;
- années 1970-1990 : diffusion des convecteurs de deuxième génération (sorties d'air frontales, régulation électrique) et premiers panneaux rayonnants, mais ne bénéficiant pas encore des composants et des matériaux les plus performants (remplacer ces appareils permet encore d'améliorer le confort thermique ressenti) ;
- années 2000 : développement et diffusion de radiateurs électriques équipés de technologies conçues pour optimiser la consommation d'énergie et la qualité de la chaleur émise.

La figure ci-contre indique la répartition des types d'équipement pour les logements chauffés à l'électricité : la moitié des équipements restent des convecteurs.

Figure 16 – Répartition des types d'équipement pour les logements chauffés à l'électricité
(Source : étude TNS Sofres réalisée en 2011 pour le GIFAM)

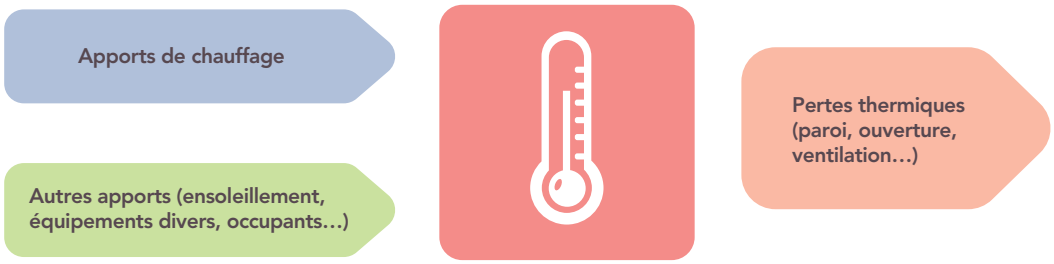


Concernant les modes de régulation, les caractéristiques essentielles résident dans les deux caractéristiques suivantes :

- *La régulation de type mécanique ou électronique*
  Dans le cas d'une régulation mécanique, le chauffage est déclenché ou arrêté en fonction des écarts à la consigne par un élément mécanique ; dans le cas d'une régulation électronique, un composant électronique de type proportionnel-intégral intègre à la fois les écarts instantanés et les écarts cumulés entre la température mesurée et la température de consigne.

  Dans le cas d'une régulation électronique, pour un fonctionnement optimale de la régulation, les différents paramètres (poids de la composante proportionnelle par rapport à la composante intégrale, constante de temps de l'intégration) doivent être

Figure 17 – Équilibre thermique d'un bâtiment



calés en fonction des caractéristiques thermiques du logement, notamment de son inertie thermique.

- *La localisation de la régulation intégrée au convecteur ou déportée* selon que la mesure de température est réalisée au niveau du convecteur même ou à un autre endroit du logement.

  Les régulations déportées permettent de disposer d'un meilleur pilotage de la température intérieure du logement, sans perturbation par la proximité de l'émetteur. Les régulateurs intégrés peuvent être complétés, ou non, par une correction de l'auto-échauffement[6]. Les premiers convecteurs ont été équipés de régulateur mécanique (dit également « bilames ») intégré avec ou sans correction de l'auto-échauffement. Les convecteurs plus récents peuvent disposer de régulateur électronique, intégré ou déporté.

Les simulations réalisées et dont les résultats sont décrits dans les paragraphes suivants sont basés sur les différents paramètres possibles liés aux appareils chauffants d'une part et à leur mode de régulation d'autre part.

3.3.3.1.3 Effacement et économies d'énergie

De façon schématique, le bilan énergétique d'un logement résulte de la différence entre d'une part les apports thermiques liés au chauffage et les apports fatals (ensoleillement, équipements du logement, occupants, etc.) et d'autre part les pertes thermiques. Les pertes thermiques peuvent être liées aux échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur ou à la circulation de l'air (ouvertures, ventilation).

Ainsi :

- les pertes thermiques sont proportionnelles à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur ;
- en régime permanent, l'ensemble des apports de chaleur équilibrent les pertes ;
- les apports liés au chauffage ne représentent qu'une part des apports totaux, les autres apports pouvant être liés à l'ensoleillement, au fonctionnement d'appareils électriques dissipant de la chaleur, aux occupants du logement, etc. Dans les logements récents et bien isolés, conformes aux versions les plus récentes de la réglementation thermique, cette part peut même devenir plus faible que celle liée aux apports naturels. Les déperditions thermiques, par définition faibles pour ce type de logement, sont alors en grande partie compensées par les apports naturels. Cela explique que, dans les logements récents, les consommations liées au chauffage électrique sont plus sensibles, en proportion, aux variations des pertes thermiques et donc aux variations de l'écart entre les températures intérieure et extérieure (à titre d'exemple, si le chauffage représente 100% des apports thermiques, une variation de 10% des pertes entraîne une variation de 10% de la consommation liée au chauffage ; dans le cas où le chauffage ne représente que 50% des apports totaux, une variation de 10% des pertes entraîne alors une variation de 20% de la consommation liée au chauffage).

La figure 18 illustre le comportement thermique d'un logement lors d'une baisse de consigne du chauffage. Lorsque la température de consigne baisse, le chauffage s'arrête et la température du logement baisse progressivement en fonction de l'inertie de celui-ci. La décroissance n'est pas linéaire (baisse rapide de la température de l'air intérieur, puis des éléments à plus forte inertie comme les murs). Une fois la nouvelle température de consigne atteinte, le chauffage redémarre. Enfin, lorsque la température de consigne revient à son niveau initial, le chauffage se met en route à pleine capacité.

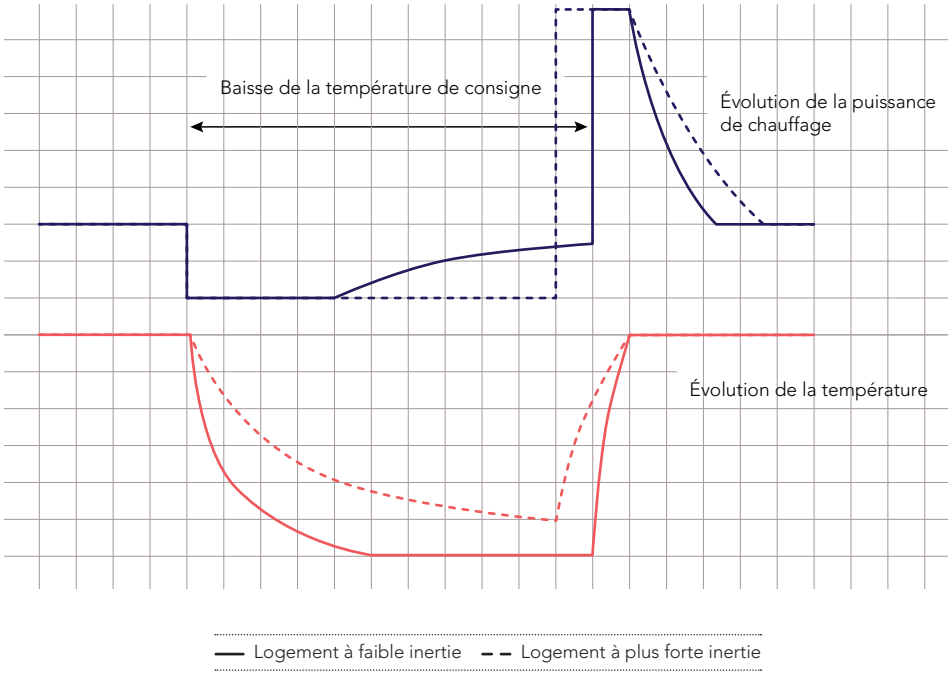
Si l'on suppose qu'un certain temps après l'effacement le logement retrouve son état thermique initial, l'économie d'énergie est alors liée à la baisse de température causée par l'effacement et la diminution des pertes thermiques qui en résulte. Ainsi, les économies d'énergie liées à un effacement ne peuvent être dues qu'à la baisse des pertes thermiques résultant de la baisse de la température intérieure du logement.

Le lien entre économies d'énergie et baisse de la température intérieure a notamment été établi par l'ADEME qui souligne qu'une consigne de température à 19°C à la place de 20°C permet une économie de 7% sur la consommation énergétique de chauffage[7].

Pour simuler les effets d'effacements de la consommation associée au chauffage, il faut tenir compte du fait que les bâtiments sont composés de multiples éléments ayant des caractéristiques inertielles différentes (murs,

6. Dans le cas des régulateurs disposant d'une mesure de température intégrée, celle-ci peut être perturbée par la proximité avec l'élément chauffant aboutissant à une mesure trop élevée par rapport à la réalité. Dans certains convecteurs, ce biais est pris en compte, on parle alors de correction de l'auto-échauffement.
7. *www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/habitation/bien-gerer-habitat*

Figure 18 – Évolution du chauffage et de la température lors d'une baisse de consigne pour des logements à faible et plus forte inertie



mobilier, air intérieur, etc.), et que les constantes de temps associées aux effacements brefs sont inférieures à celles qui caractérisent un logement. Une approche complexe est alors nécessaire pour rendre compte de la réalité du phénomène physique. Si les simulations décrites au paragraphe 3.3.3.2 s'efforcent de modéliser les différents paramètres représentatifs, il convient de noter que la finesse, les points forts et limites de ce type de simulation font l'objet de débats scientifiques et techniques, et que la faculté des modèles existants à rendre compte des flux thermiques dans le cadre d'effacements courts a pu être interrogée lors de la présentation des résultats en CURTE. En particulier, pour la simulation des effacements de durée brève, des travaux complémentaires pourraient à l'avenir être nécessaires pour affiner la modélisation du comportement d'un logement dans les périodes suivant ces effacements, par exemple dans le cas de régimes non stationnaires.

Cependant, les limites de ces travaux de simulation ne remettent pas en cause ce qui est généralement considéré, à savoir qu'un effacement ne puisse conduire à des économies d'énergie significatives que s'il est associé à une baisse de la température intérieure du logement qui peut engendrer une perte de confort pour le résidant (cette notion étant subjective et dépendant des conditions initiales préalables à l'effacement – une perte de 1 °C peut ne pas avoir le même impact sur le confort de l'occupant si la température initiale du logement est de 21 °C ou si elle est de 19 °C).

Certains opérateurs d'effacement ont défendu le principe d'économies d'énergie sans impact sur le confort de l'occupant. Si la notion de perte de confort reste subjective et dépendante de la perception individuelle des occupants, il semble important de rappeler que les économies d'énergie consécutives à un effacement ne peuvent être liées qu'à la baisse de la température du logement (qu'elle soit ressentie ou non par l'occupant est une autre question).

3.3.3.2 Les simulations thermiques réalisées

3.3.3.2.1 Protocole de simulation

Les simulations réalisées dans le cadre de ce rapport ont été effectuées à partir d'un ensemble d'outils de modélisation des bâtiments et de leurs équipements qui permettent d'effectuer des simulations dynamiques des flux thermiques (bibliothèque SIMBAD – *Simulator of building and devices*, développée par le CSTB).

Leurs caractéristiques ont été définies en fonction des éléments décrits ci-dessus et relatifs aux caractéristiques

du parc de logements chauffés principalement à l'électricité, aux caractéristiques des systèmes de chauffage électrique existants et de la régulation associée. Par ailleurs, des schémas type d'effacement ont été définis : effacements courts de 30 minutes ou 1 h 30 activés le matin ou le soir, effacements longs de 8 heures. Enfin, les simulations intègrent des logements situés dans différentes zones climatiques (Nancy, Rennes et Nice), et pour chacune des zones des conditions climatiques normales pour une semaine d'hiver, ainsi que des conditions correspondant à une semaine froide d'hiver.

Pour chacun des scénarios, l'équilibre thermique du logement et le fonctionnement du système de chauffage sont simulés sur une semaine à un pas de temps très fin (30 secondes). Les simulations intègrent également des hypothèses concernant l'occupation des logements. Chacune des simulations est représentative d'une semaine de consommation énergétique.

Pour les appartements, les simulations prennent en compte les flux thermiques à l'interface avec les appartements voisins. En revanche, le report est évalué au périmètre de l'appartement considéré. Un éventuel impact de l'effacement sur la consommation des logements voisins qui réagiraient à un écart de température avec le logement effacé n'est pas pris en compte. Cela constitue une limite de l'étude présentée.

L'ensemble des simulations réalisées sont décrites en annexe. Les types d'effacement ayant donné lieu à des simulations sont les suivants :

- Cas 1 : effacement continu de 30 minutes à 7 h ;
- Cas 1*bis* : effacement continu de 30 minutes à 18 h 30 ;
- Cas 2 : 3 effacements de 10 minutes avec 20 minutes de repos entre 2 effacements, débutant à 7 h ;
- Cas 2*bis* : 3 effacements de 10 minutes avec 20 minutes de repos entre 2 effacements, débutant à 18 h 30 ;
- Cas 3 : 16 effacements de 10 minutes avec 20 minutes de repos entre 2 effacements, débutant à 7 h.

Les logements pour lesquels des effacements ont été simulés sont de trois types :

- Maison Puccini : maison individuelle de 90 m² sur deux étages et des combles (maison en environnement urbain),
- Maison Mozart : maison individuelle de 100 m² sur un niveau habitable et 5 pièces principales,
- Appartement Gauguin : appartement de 95 m² avec 5 pièces principales.

Les plans de ces logements figurent en annexe.

Les caractéristiques thermiques de la maison et de l'appartement ont été définies, par période de construction selon la méthodologie suivante :

- pour les logements construits avant 1980 : les exigences sont issues du rapport d'analyse détaillée du parc résidentiel existant (RAGE – septembre 2012) ;
- pour la période 1980-1990 : les exigences retenues sont issues de la RT 1988 ;
- pour la période 2000-2005 : les exigences retenues sont issues de la RT 2000 ;
- pour les années postérieures à 2012 : les exigences retenues sont issues de la RT 2012.

Au total et compte-tenu de la combinatoire associée aux différents paramètres, environ 2000 simulations ont été réalisées.

Pour chaque cas test ainsi défini, deux simulations sur une semaine complète ont été réalisées, l'une sans effacement, l'autre avec. L'effacement est réalisé en milieu de semaine (le 4e jour), les flux thermiques, la température intérieure du logement et la réponse du système de chauffage sont modélisés sur chaque jour de la semaine en prenant en compte les caractéristiques d'isolation et d'inertie du logement, les caractéristiques des éléments chauffants et de la régulation associés. La comparaison entre les deux simulations permet d'évaluer les taux d'économie d'énergie associés aux différents effacements.

Le climat normal correspond à une semaine d'hiver avec une température proche de la normale (normale des hivers 1994-2008) ; le scénario froid est établi en prenant la semaine la plus froide d'un hiver normal.

3.3.3.2.2 Résultats obtenus

3.3.3.2.2.1 Un report étalé dans le temps et conduisant à des taux de report élevés sur la plage d'observation

Les taux de report obtenus pour l'ensemble des cas simulés sont globalement élevés. Le graphique ci-dessous présente la répartition des taux obtenus (taux calculés sur les effacements constatés et sur les ordres d'effacement). Le taux obtenu est inférieur à 80 % pour uniquement environ 15 % des cas simulés. La majeure partie de cas simulés donnent lieu à une évaluation du report comprise entre 80 et 90 %.

Les simulations sont effectuées sur une semaine complète, l'effacement ayant lieu le 4e jour. Elles permettent

Figure 19 – Répartition des taux de report obtenus sur les cas test (sur 3 jours)

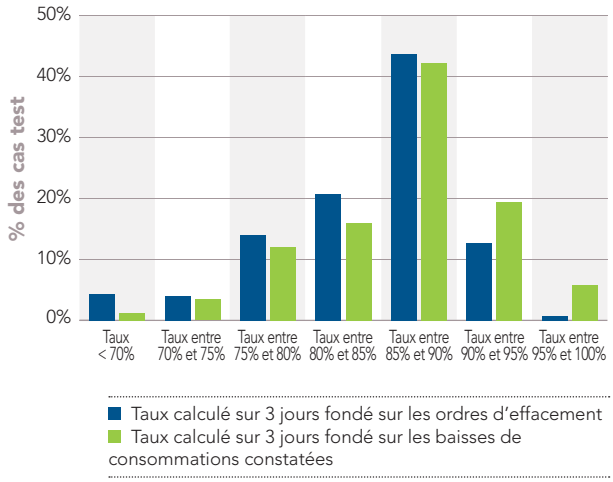


Figure 20 – Évolution du taux report en fonction de la durée des effacements

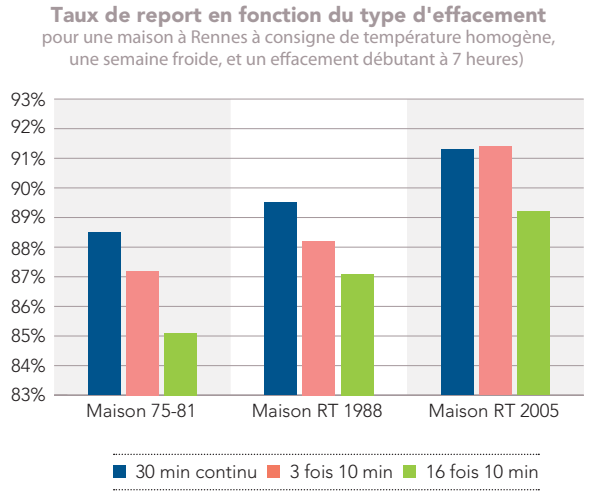
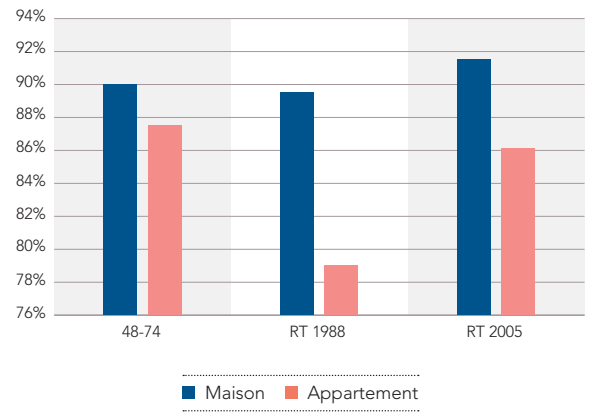


Figure 21 – Taux de report comparés Maison/appartement



d'évaluer, de façon simulée, le report sur 3 jours complets après l'effacement. Les simulations mettent en évidence un report très étalé dans le temps, se poursuivant même 24 heures après la fin de l'effacement.

3.3.3.2.2.2 Les principaux facteurs d'influence

L'un des objectifs de la simulation théorique porte sur la mise en évidence des principaux facteurs d'influence sur le taux de report fondé sur les baisses de consommation constatées, telles que pris en compte par la simulation, afin d'éclairer les résultats des expérimentations présentées dans la partie précédente.

• Influence du type et de la durée des effacements

Le graphique suivant représente l'évolution du taux de report pour les différents types d'effacements testés.

Le taux de report simulé semble diminuer pour les effacements longs pour les maisons de classe 1975-1981 et RT 2005. Il est stable pour les maisons RT 1988. Ceci est cohérent avec une baisse de la température plus importante pour des effacements de longue durée, donc avec un effet positif sur les pertes thermiques et un rattrapage moindre de la consommation.

• Influence de la nature du logement, maison ou appartement

Le graphique suivant représente l'évolution du taux de report pour une maison et un appartement de la même période de construction pour un effacement de 30 minutes débutant à 7 h.

Le taux de report simulé semble plus élevé pour les maisons individuelles que pour les logements collectifs. La différence est la plus marquée pour les logements conformes aux exigences de la RT 1998.

• Influence de la période de construction du logement

L'évolution du taux de report simulé a été représentée, pour un appartement ou une maison située à Rennes et un effacement de 30 minutes débutant à 7 h, selon différentes périodes de construction.

Le graphique ne permet pas de dégager une tendance nette relative à la sensibilité à la période de construction. Avec l'évolution des normes thermiques, les caractéristiques des logements ont évolué aussi bien en termes d'isolation que d'inertie, ces différents paramètres pouvant

entrainer des influences opposées sur le report. Ceci peut expliquer l'absence de tendance observée sur ce graphe. On retrouve néanmoins le résultat que les taux de report seront plus élevés dans les logements les plus récents, caractérisés par une isolation thermique performante et une part du chauffage plus faible dans les apports.

• Influence de l'heure de la journée et de la programmation du chauffage

Le graphique ci-dessus représente l'évolution du taux de report simulé pour différents effacements en fonction de l'heure de la journée ou d'une programmation différenciée jour/nuit de la consigne de température.

Si l'heure de la journée ne semble pas avoir d'influence dans les cas où la température de consigne de chauffage reste identique tout au long de la journée, le taux de report est plus faible le soir que le matin lorsque la température de consigne est plus basse la nuit que la journée. Cet écart entre le taux de report associé aux effacements activés le matin et le soir se retrouve dans tous les types de maison disposant d'un réduit de nuit, c'est-à-dire une baisse la température de consigne du dispositif de chauffage de 21 à 18 °C durant la nuit, plus précisément entre 22 h et 7 h.

3.3.3.3 Conclusions

Les travaux théoriques menés avec le CSTB mettent en évidence, sur la base des simulations réalisées, les éléments suivants :

1) **le report est quantitativement important** sur toutes les simulations réalisées pour différents types de logement et différents systèmes de chauffage représentatifs du parc français, et pour des effacements réalisés selon des protocoles différents. Le taux de report est supérieur à 85 % dans la majorité des 2000 cas simulés.

2) **le report modélisé est un phénomène diffus, de durée très longue :** il pourrait ainsi s'étaler sur trois jours. 24 heures après l'effacement, le report est inférieur à 100 %.

3) l'étude permet **d'identifier les principaux facteurs d'influence sur le report** pris en compte dans la simulation: le type de logement, la durée de l'effacement, l'heure de l'effacement en présence d'une programmation du chauffage. Cependant, ces derniers ont une influence faible sur les taux simulés et n'en modifient pas l'ordre de grandeurs.

Figure 22 – Taux de report pour une maison ou un appartement en fonction de la période de construction

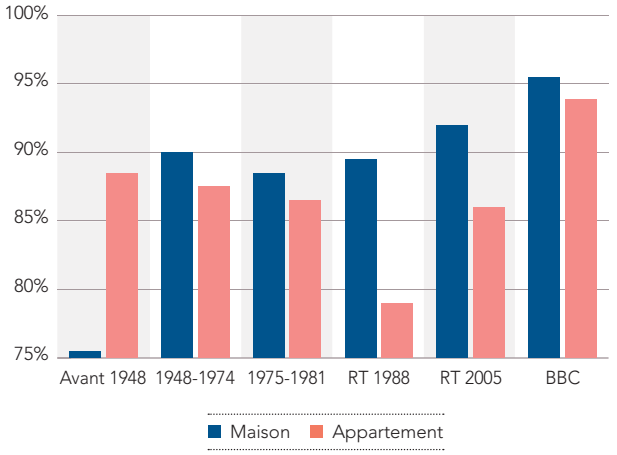


Figure 23 – Évolution du taux de report matin/soir avec ou sans réduit de nuit

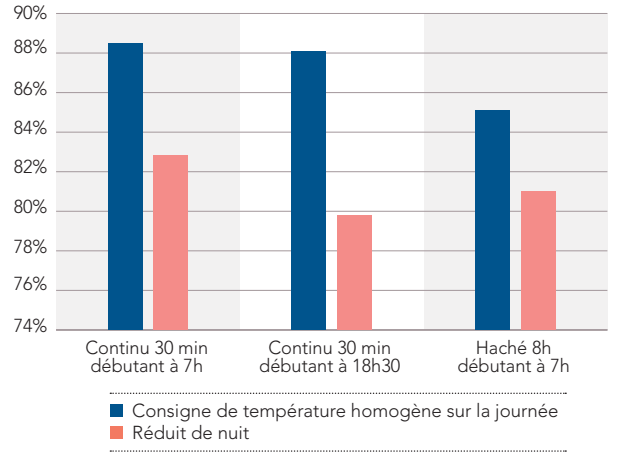
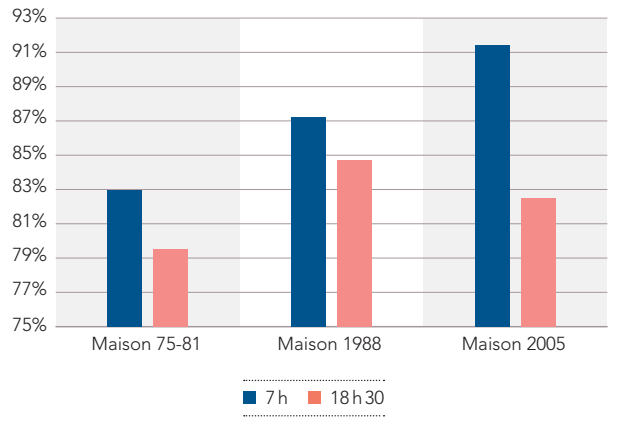


Figure 24 – Évolution du taux de report matin/soir pour différents types de maison avec réduit de nuit



4) **il n'existe pas de profil-type de report de consommation.** Les résultats théoriques mettent en évidence l'absence de comportement-type pour le report de consommation pour l'effacement électrique résidentiel sur du chauffage électrique. La forme et la durée du report diffèrent selon les sites de consommation. Par ailleurs, le taux dépend largement de la façon dont les effacements sont réalisés (et notamment des modalités d'agrégation retenues par les opérateurs d'effacement). Il est donc difficile de disposer d'un unique taux de report pour l'ensemble de ces effacements et **cela met en exergue la complexité associée à la mise en place de la prise en compte explicite normative du report de consommation dans les règles.**

Au terme de ces travaux de simulation théorique, il semble ainsi possible de rendre compte qualitativement de certaines corrélations entre le report simulé et certains paramètres pris en compte par la simulation. Toutefois, la faculté des outils de modélisation utilisés à rendre compte de façon suffisamment fine des conséquences d'effacements brefs de la consommation de logements a pu être interrogée durant la concertation, certains opérateurs d'effacement considérant que, parce qu'ils ont été développés dans un cadre et avec des objectifs différents, ces outils pourraient ne pas permettre d'établir une quantification des phénomènes d'économie d'énergie et de report résultant de ces effacements. Des travaux complémentaires pourraient être envisagés afin d'enrichir ces modèles à partir des expériences réalisées ou de nouvelles expériences à définir pour ce faire.

4. ÉTUDES ÉCONOMIQUES

Les éléments présentés aux chapitres précédents contribuent à documenter la connaissance commune des effacements de consommation et des effets de bords associés. S'ils permettent effectivement de disposer d'évaluations chiffrées du report, ils montrent également que des marges d'erreur encore importantes entourent la détermination des valeurs exposées. Par ailleurs, tant le caractère long et diffus du report s'agissant du chauffage électrique dans le secteur résidentiel que la grande hétérogénéité des situations rencontrées en matière d'effacements industriels rendent encore plus incertaine la traduction d'un taux moyen et normatif en une chronique précise de report au pas demi-horaire durant la période postérieure à l'effacement.

Dans un contexte d'ouverture de l'ensemble des mécanismes de marché à la participation des effacements et d'incertitude dans l'évaluation des effets de bord qui y sont associés, la façon de prendre en compte ces effets dans les règles des mécanismes représente pourtant un enjeu potentiellement important. Cet enjeu porte d'une part sur l'économie générale des effacements de consommation (sont-ils activés aux moments optimaux vu du système ?), et d'autre part sur certains acteurs en particulier (c'est notamment le cas pour le fournisseur du site effacé et son responsable d'équilibre, dont certains considèrent qu'ils risqueraient d'être fortement lésés par une prise en compte insuffisamment rigoureuse de l'effet report).

En théorie, il est optimal de prendre en compte le report de manière explicite dans les règles de marché, avec un traitement similaire dans ses principes et symétrique dans ses flux à celui appliqué pour la période d'effacement : correction du périmètre du RE du site effacé et versement du RE/fournisseur à l'opérateur d'effacement. Toutefois cette prise en compte explicite représente d'une part une complexification, éventuellement coûteuse, des mécanismes et requiert d'autre part de savoir déterminer correctement le niveau du report de consommation et son profil. Dans un contexte où l'évaluation du report demeure entourée d'incertitudes, il convient d'évaluer l'importance des dégradations, par rapport à l'optimum théorique, que représenterait une prise en compte incorrecte du report dans les règles de marché, voire une absence de prise en compte explicite (situation actuelle).

C'est l'objet des résultats présentés dans le présent chapitre. Ces éléments ont ainsi vocation d'éclairer la prise de décision publique en prenant en compte l'incertitude structurelle sur certains paramètres techniques devant trouver une traduction réglementaire et en évaluant ses conséquences en matière d'optimalité des règles de marché. Les paramètres évalués sont les suivants :

- d'une part l'impact *pour la collectivité* d'une prise en compte incorrecte du taux de report dans les règles de marché (différence entre taux de report réglementaire et taux de report réel) ;
- d'autre part l'impact sur le couple *{RE ; fournisseur}* d'une prise en compte explicite du report dans les règles (par rapport à la situation où un report éventuel engendre un écart dans le périmètre du RE du fournisseur et aucun versement de sa part à l'opérateur d'effacement).

Dans ces deux études, réalisées sur la base des mêmes méthodes et hypothèses (cf. encadré), on ne s'intéresse qu'aux effacements résidentiels de chauffage électrique, et le cadre de valorisation des effacements de consommation retenu est celui des règles NEBEF 2.0 en vigueur, et non celui défini par l'article 168 de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

4.1 Impact, pour la collectivité, d'un mauvais choix de taux de report dans les règles des mécanismes de marché

À court terme, la valeur apportée à la collectivité par un effacement de consommation réside principalement dans les coûts de combustible qu'il permet d'économiser en évitant de la production d'électricité[8]. Ces coûts évités par l'effacement varient :

- d'une part en fonction du report de consommation effacée (plus le report est important, moins l'économie de combustible est importante *a priori)* ;

8. On néglige ainsi, par souci de simplification, les éventuelles externalités environnementales et l'éventuelle perte de confort de bien-être du consommateur effacé. On ne considère par ailleurs pas non plus la valeur de long terme que représentent les coûts évités d'investissement dans des moyens de production supplémentaires. Les autres externalités envisageables (gains pour les réseaux en ce qui concerne les renforcements évités ou les pertes économisées, voire gains pour les RE *via* une diminution du coût d'équilibrage) ne sont pas non plus intégrées.

Cadre d'analyse et hypothèses

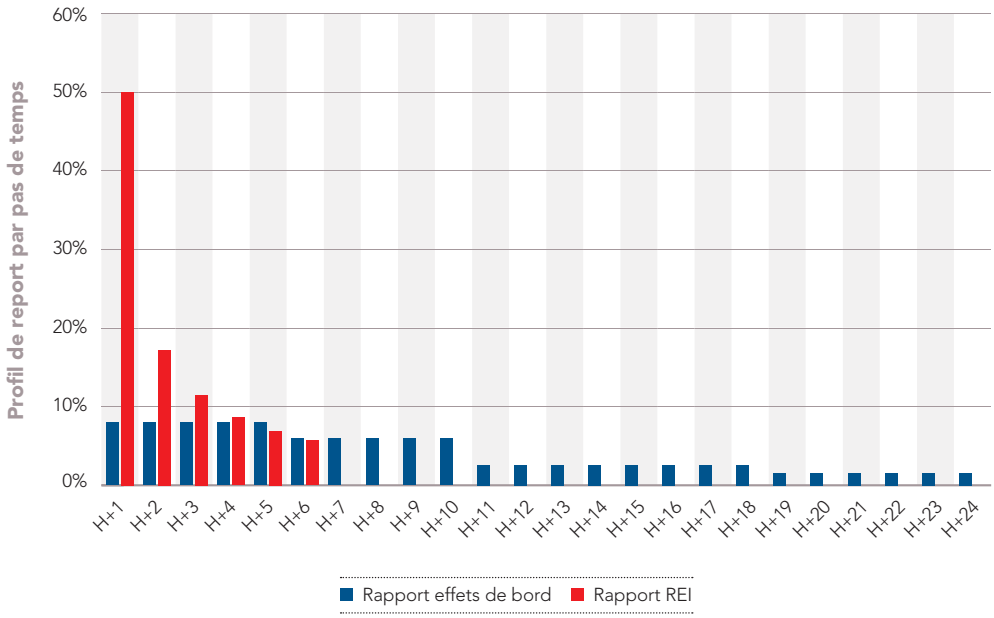
Les études dont les résultats restitués dans ce chapitre reposent sur l'analyse de simulations d'effacements, et de reports de consommation associés, réalisés par une capacité d'effacement donnée. Le périmètre est limité à l'effacement résidentiel (de type effacement de chauffage électrique) valorisé sur le marché de gros de l'électricité (dans le cadre du mécanisme NEBEF). On considère et compare, dans ce cadre, le placement des activations de la capacité d'effacement et la valeur créée pour différentes hypothèses de taux de report «réglementaire» du marché (signal économique envoyé à l'opérateur d'effacement) et de taux de report «réel» associé à la capacité d'effacement.

Sur le périmètre étudié, on considère une capacité d'effacement de chauffage électrique dont les caractéristiques techniques sont les suivantes :

- capacité effaçable d'une puissance normative de 1 MW ;
- coût variable d'activation nul ;
- disponibilité 24h sur 24 entre le 1er novembre et le 31 mars (3624 heures par an) ;
- possibilité d'activation par tranche de 1 heure, au maximum 4 fois par jour, avec au minimum 1 heure entre deux activations ;
- taux de report réel qui, par souci de simplification, peut prendre 3 valeurs (0%, 50% ou 100%), qui s'étale sur les 24 heures suivant l'heure d'effacement et dont le profil prend la forme suivante (en bleu).

Cette dernière hypothèse est compatible avec les conclusions présentées au § 3.3 sur la longueur du phénomène de report (le report n'est alors pas concentré durant la première heure suivant l'effacement). Elle diffère par exemple de celle retenue dans le rapport «Valorisation socio-économique des réseaux électriques intelligents» (rapport «REI») publié par RTE et ses partenaires le 9 juillet 2015 (dont le profil est figuré en rouge dans la figure ci-dessous).

Figure 25 – profil de report considéré dans les études économiques de valorisation des effacements



- d'autre part en fonction des moments où sont activés les effacements puisque le combustible économisé dépend du moyen dont la production est évitée, qui lui-même varie dans le temps (typiquement le coût de combustible évité sera plus important lorsque l'effacement est activé pendant un pic que pendant un creux de consommation car il permettra d'éviter de la production de pointe plutôt que de la production de base).

Sur cette base, la valeur économique des effacements est supposée d'autant plus élevée que les activations ont lieu aux heures où les prix de marché sont importants[9] et que le report éventuel de consommation a lieu aux heures où les prix de marché sont faibles.

Un des enjeux liés à une prise en compte « explicite » du report dans les règles consiste à bien estimer le taux de report de consommation associé à l'effacement. On peut en effet supposer qu'un opérateur d'effacement placerait alors ses activations d'effacement en tenant compte du taux de report réglementaire, aux heures qui maximisent la différence entre ce qu'il retirerait de l'effacement et ce que lui coûterait le report ainsi pris en compte.

Schématiquement, quel que soit le taux de report réel de ses effacement :

- si le taux de report des règles est de 0 %, l'opérateur d'effacement est incité à placer ses activations aux heures $h_{0\%}$ où Prix($h_{0\%}$) est maximal ;
- si le taux de report des règles est de 100 % (et le report réputé intervenir intégralement sur l'heure suivant l'effacement), l'opérateur d'effacement est incité à placer ses activations aux heures $h_{100\%}$ où Prix(h)-Prix(h+1) est maximal.

Un taux de report réglementaire différent du taux de report réel risque donc d'envoyer de mauvaises incitations aux opérateurs d'effacement qui, en cherchant à maximiser leurs revenus, placent les effacements en fonction du taux réglementaire (et non du taux réel). Ceci pourrait entrainer un placement sous-optimal des effacements et une perte de valeur pour la collectivité[10]. La détermination du taux de report réel faisant l'objet d'incertitudes, la question posée par la prise en compte du report dans les règles de marché peut s'aborder comme une question de minimisation du regret.

Afin d'estimer l'ordre de grandeur des effets d'un taux de report réglementaire différent du taux réel, l'étude menée vise à comparer le surplus social engendré par une capacité d'effacement dans différentes configurations combinant un taux de report réel et un taux réglementaire égal ou différent tel que résumé dans le tableau 5 ci-contre. Plus précisément, le principe de l'étude est, pour chaque configuration de taux réel et de taux réglementaire, d'identifier les heures d'activations d'effacements en accord avec les incitations données par le taux réglementaire puis d'analyser le surplus social généré par ces activations selon l'hypothèse de taux réel[11]. Les éventuelles autres sources de désoptimisation du placement des effacements[12] sont dans cette étude neutralisées afin de ne mesurer que l'effet lié à la prise en compte du taux de report.

Les résultats permettent de visualiser l'impact du report réel sur la valeur des effacements – effet déjà quantifié dans le rapport sur l'évaluation socio-économique des réseaux électriques intelligents (*smart grids*) remis par RTE et ses partenaires le 9 juillet 2015. Cependant, il s'agit ici d'estimer l'enjeu de la prise en compte réglementaire du report. Si le report est pris en compte explicitement dans les règles, le choix du taux réglementaire a un impact sur le placement des activations par les opérateurs d'effacement et, partant, sur la valeur apportée par ces effacements pour la collectivité : si le taux réglementaire est de 0 %, comme c'est le cas aujourd'hui, tandis que le taux réel serait de 50 %, alors la perte pour la collectivité s'élève dans le pire des cas à 0,2 k€ par MW de capacité effaçable par an (1 % de la valeur maximale de la capacité). Dans le même cadre réglementaire, la

9. Sous une hypothèse de concurrence pure et parfaite, le prix de marché représente le coût marginal de production du moyen marginal, donc constitue une bonne approximation du coût de combustible du moyen de production auquel l'effacement se substitue.

10. Par exemple, si le taux de report réel est de 100% et le taux réglementaire de 0%, alors l'opérateur d'effacement est incité à placer les activations aux heures $h_{0\%}$ alors qu'il serait socialement optimal qu'elles soient placées aux heures $h_{100\%}$.

11. Si x est le taux de report réel de la capacité d'effacement (xi la part de l'énergie effacée qui est reportée à la ième heure suivant l'effacement) et ♢ le taux de report réglementaire, alors le couple {opérateur d'effacement-consommateur} est incité à activer des effacements aux heure h qui maximisent l'écart entre son gain (valorisation de l'effacement sur le marché + économie de fourniture du consommateur) et son coût (versement NEBEF) sur l'ensemble de la période effacement+report. La valeur créée pour la collectivité, sur cette même période, peut quant à elle être estimée par : Spoth – ∑i xi.Spoth+i.

12. Les dépenses évitées par le couple {opérateur d'effacement ; consommateur} lors d'un effacement ne reflètent pas nécessairement les coûts évités pour la collectivité. En effet, le couple {opérateur d'effacement ; consommateur} évite certaines dépenses qui devront *in fine* être portées par d'autres acteurs économiques (par exemple, taxes, coûts de commercialisation du fournisseur inclus dans la composante énergie du tarif, etc.).

perte s'élève à 1,1 k€/MW/an pour la collectivité si le taux de report réel de la capacité est de 100 % (14 % de sa valeur maximale).

Ces résultats montrent que, sous les hypothèses retenues, la perte de valeur pour la collectivité induite par un « mauvais » choix de taux de report réglementaire est faible. Ainsi, si la prise en compte du taux de report réel dans les règles constitue bien un enjeu de « placement » des activations (le choix des instants d'effacement) pour l'optimisation économique du potentiel d'effacement, celui-ci doit être relativisé. Il convient toutefois de noter que, si l'incertitude est totale quant au taux de report réel du site qui s'efface, alors le coût de l'erreur possible, donc du « regret », est minimisé en choisissant un taux réglementaire de 50 %.

Tableau 5 – Valeur économique créée pour un taux de report réel donné en fonction du taux de report des règles (calculée en moyenne sur la période 2011-2015)

	Taux réglementaire : 0 %	Taux réglementaire : 50 %	Taux réglementaire : 100 %
Taux réel 0 %	36,4 k€/MW.an Taux réglementaire optimal	36,3 k€/MW.an Valeur perdue / optimum : -0,1 k€/MW.an	36,0 k€/MW.an Valeur perdue / optimum : -0,4 k€/MW.an
Taux réel 50 %	21,8 k€/MW.an Valeur perdue / optimum : -0,2 k€/MW.an	22,0 k€/MW.an Taux réglementaire optimal	21,9 k€/MW.an Valeur perdue / optimum : -0,1 k€/MW.an
Taux réel 100 %	7 k€/MW.an Valeur perdue / optimum : -1,1 k€/MW.an	7,7 k€/MW.an Valeur perdue / optimum : -0,4 k€/MW.an	8,1 k€/MW.an Taux réglementaire optimal

4.2 Impact de la prise en compte explicite du report dans les règles sur le couple {RE ; fournisseur}

Le second champ d'analyses porte sur les effets redistributifs associés à la prise en compte du report, notamment pour une catégorie d'acteurs traditionnellement audible sur ces problématiques : le couple {RE ; fournisseur} des sites effacés.

En l'absence de prise en compte explicite du report (ou, ce qui est équivalent, en cas de prise en compte explicite à hauteur d'un taux réglementaire de 0 %), alors, sur la période où a lieu le report de consommation du site effacé, son fournisseur perçoit des recettes de fourniture sur l'énergie reportée. En revanche, son responsable d'équilibre (RE), dont l'équilibre du périmètre est modifié par le report (et non corrigé de celui-ci), doit approvisionner l'énergie supplémentaire consommée par les client pendant le report et pour ce faire acheter l'énergie à un prix dépendant de sa stratégie d'approvisionnement : le prix de règlement des écarts (PRE) s'il n'a pu anticiper cette consommation supplémentaire ou le prix Spot s'il pouvait, avec les informations dont il dispose (notamment les informations sur les volumes d'effacement sur le périmètres des sites dont il est le RE), l'anticiper.

À l'inverse, en cas de prise en compte explicite du report (et sous l'hypothèse que le taux et le profil réglementaire correspond au taux et profil réel de report), alors le fournisseur perçoit toujours les recettes de fourniture sur l'énergie reportée, mais le report n'induirait pas d'impact sur le périmètre du RE et donnerait lieu, en contrepartie, à un versement de la part du fournisseur (symétrique à celui reçu par le fournisseur pendant l'effacement).

L'impact, pour le couple {RE ; fournisseur} de la prise en compte explicite du report dans les règles, s'apprécie donc à l'aune de l'écart entre le prix d'approvisionnement par le RE de l'énergie supplémentaire consommée par ses clients pendant le report (prix de règlement des écarts payé par le RE ou prix Spot selon l'anticipation effectuée par le RE) et le prix du versement NEBEF appliqué à la consommation d'énergie reportée.

L'exercice d'évaluation de l'impact a été réalisé sous différentes hypothèses contrastées, afin de dimensionner l'ordre de grandeur de l'enjeu. Un majorant de l'impact a été estimé en supposant le PRE payé par le RE

systématiquement égal au prix de règlement des écarts négatifs (PREN), ce qui revient à supposer que le report induit (ou accroît) toujours un écart négatif dans le périmètre d'équilibre du RE. À l'inverse, un minorant est estimé en considérant le prix de règlement des écarts positifs, et donc en supposant que le report permet toujours de réduire un écart positif dans le périmètre d'équilibre du RE. Une hypothèse médiane consiste à valoriser au prix spot en reflétant la situation d'un RE ayant anticipé l'effet du report sur son périmètre.

Ces estimations sont synthétisées dans le tableau suivant, pour les trois hypothèses de prix d'approvisionnement de l'énergie supplémentaire consommée par les consommateurs pendant le report (hypothèses haute, médiane et basse), en €/MW effaçable par an d'une part, et en €/MWh effacé (en gras) d'autre part. Elles permettent de déduire le gain (valeur positive) ou le coût (valeur négative) pour le couple {RE-fournisseur} associé au passage d'une situation où le report n'est pas pris en compte dans les règles (prise en compte implicite *via* le règlement des écarts[13]), à une situation où le report est explicitement pris en compte dans les règles (le cas échéant, avec un taux correspondant au report réel). Les valeurs présentées ne concernent que les flux économiques relatifs à la période du report de consommation, sans prise en compte de ceux relatifs à la période de l'effacement lui-même.

Tableau 6 – Gain annuel moyen (sur 2011-2015) procuré au couple {RE-fournisseur} par une prise en compte explicite dans les règles du report de consommation du site effacé

Gain pour le couple {RE-fournisseur} induit par une prise en compte explicite du report dans les règles	Taux réel 0 %	Taux réel 50 %	Taux réel 100 %
Majorant : Impact = PREN – versement (RE toujours équilibré ou en écart négatif)	0 k€/MW/an **0 €/MWh**	2,8 k€/MW/an **4,7 €/MWh**	6,6 k€/MW/an **13,7 €/MWh**
Médian : Impact = Spot – versement	0 k€/MW/an **0 €/MWh**	0,4 k€/MW/an **0,7 €/MWh**	2,5 k€/MW/an **5,1 €/MWh**
Minorant : Impact = PREP – versement (RE toujours en écart positif)	0 k€/MW/an **0 €/MWh**	-2,1 k€/MW/an **-3,6 €/MWh**	-1,8 k€/MW/an **-3,7 €/MWh**

Il ressort de ces calculs que, considérant un consommateur dont le taux de report réel est de 50 %, l'impact estimé pour son fournisseur et son RE d'une prise en compte explicite de ce taux dans les règles va d'un gain de 4,7 €/MWh à une perte de 3,6 €/MWh avec, en estimation médiane, un gain de 0,7 €/MWh. Pour un taux de report de 100 %, l'impact de la prise en compte explicite du report va d'un gain de 13,7 €/MWh à une perte de 3,7 €/MWh, avec un gain médian de 5,1 €/MWh[14].

Ces estimations obtenues en moyennes pluriannuelles (sur la période 2011-2015) doivent par ailleurs être révisées à la baisse sous une conjoncture de prix bas et plats : sur les données de la seule année 2015, la prise en compte explicite d'un report de 50 % aurait, en estimation médiane, un impact négatif (perte de 1,1 €/MWh) sur le fournisseur par rapport à l'absence de prise en compte (cf. ci-dessous). Autrement dit, en 2015, le passage à une prise en compte explicite du report serait au détriment, toutes choses étant égales par ailleurs, du couple {RE – fournisseur] des sites. Cela s'explique simplement par le fait que les prix de marché sont devenus en moyenne plus faibles que le niveau du versement, fondé pour sa part sur la part énergie des tarifs réglementés de vente.

13. Dans le cas où l'effacement est suivi d'un report mais où ce report ne fait pas l'objet d'une prise en compte explicite, le fournisseur du site reçoit des recettes supplémentaires tandis que le RE des sites fait face à des coûts supplémentaires associés à cette énergie. Le report est donc pris en compte de manière « implicite ».

14. L'impact estimé d'un report de 100 % n'est pas le double de celui d'un report de 50 % car le placement optimisé des activations par l'opérateur d'effacement, en fonction du taux réglementaire et du taux réel de report est différent entre les deux hypothèses.

Tableau 7 – Gain annuel procuré au couple {RE-fournisseur} par une prise en compte explicite dans les règles du report de consommation du site effacé, sur données 2015 seules

Gain pour le couple {RE-fournisseur} induit par une prise en compte du report dans les règles	Taux réel 0 %	Taux réel 50 %	Taux réel 100 %
Majorant : Impact = PREN – versement (RE toujours équilibré ou en écart négatif)	0 k€/MW/an **0 €/MWh**	0,6 k€/MW/an **1,0 €/MWh**	2,8 k€/MW/an **6,7 €/MWh**
Médian : Impact = Spot – versement	0 k€/MW/an **0 €/MWh**	-1,1 k€/MW/an **-1,9 €/MWh**	0,1 k€/MW/an **0,3 €/MWh**
Minorant : Impact = PREP – versement (RE toujours en écart positif)	0 k€/MW/an **0 €/MWh**	-3,3 k€/MW/an **-5,5 €/MWh**	-2,9 k€/MW/an **-7,0 €/MWh**

Au total, l'absence, aujourd'hui, de prise en compte explicite du report dans les règles présente un impact incertain pour le couple {RE ; fournisseur}. Cet impact est plutôt négatif en estimation médiane (le couple {RE ; fournisseur} gagnerait, sur le temps long, à ce que le report soit pris en compte explicitement), mais demeure assez faible le cas échéant (1 €/MWh), notamment si on compare son ordre de grandeur à celui du prix de versement (environ 44 euros par MWh en moyenne). De surcroit, à court terme, cet impact est encore réduit (voire inversé) par le niveau exceptionnellement bas des prix actuels : dans la conjoncture actuelle, l'absence de prise en compte explicite du report aurait, dans le cas général, tendance à avantager le couple {RE ; fournisseur}.

4.3 Bilan et prolongements

Le passage à une prise en compte explicite de l'effet report des effacements diffus dans les règles représente un enjeu théorique d'optimisation de la valeur collective du potentiel d'effacement – ici, l'effacement résidentiel.

La prise en compte dans les règles d'un taux de report (ou l'absence de prise en compte, qui équivaut à un taux nul) différent du taux réel sur lequel pèse aujourd'hui des incertitudes envoie en effet des signaux économiques théoriquement non pertinents, qui conduisent à une activation des effacements à des instants non optimaux. Ces « mauvais » placements, au sens de la valeur pour la collectivité, peuvent conduire en théorie à sous-exploiter le potentiel économique.

À partir de l'étude des données historiques, l'on peut estimer que la situation actuelle, basée sur un taux réglementaire de 0 %, conduit à une perte de valeur infime (1 %) si le taux réel de report est de 50 %, et à un écart plus important s'il est de 100 % (14 %). Vues les valeurs avancées plus haut dans le rapport, le placement théorique des effacements diffus, tel qu'il devrait ressortir de la réglementation actuellement en vigueur, génère toutes choses étant égales par ailleurs une perte de valeur faible, pour la collectivité, par rapport à un placement optimal.

Du point de vue redistributif, l'enjeu économique pour le fournisseur (et son RE) est incertain: selon les hypothèses, la prise en compte dans les règles d'un report de 50 % pourrait représenter pour lui un effet allant de négatif (-4 €/MWh) à positif (+5 €/MWh), avec une estimation médiane positive mais faible, qui serait le cas échéant du second ordre par rapport au prix du versement.

Ces études montrent également qu'une prise en compte financière du report de consommation (par opposition à une prise en compte physique, la prise en compte financière consiste à modifier le prix de versement pour prendre en compte « l'externalité » financière que constitue l'impact du report pour le couple {RE ; fournisseur}) serait également complexe à mettre en œuvre.

En l'absence d'hypothèses consolidées sur le taux réel du report de consommation, des études complémentaires seront nécessaires pour évaluer le meilleur choix en termes de regret potentiel quant à la valeur collective qui peut être retirée du potentiel d'effacement diffus.

Les enjeux restent à ce stade proportionnés au niveau de développement de l'effacement diffus et à sa participation sur les marchés énergie. Cependant ces résultats semblent pouvoir être extrapolés sur le mécanisme d'ajustement où les volumes sont plus significatifs.

Enfin, il doit être noté que d'autres études économiques ont été mentionnées durant la concertation et pourraient être menées à bien par la suite. Ces études porteraient directement sur l'impact de la mise en place du régime de versement mutualisé prévu par l'article 168 de la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte, en matière de placement des effacements et d'impact pour le système électrique et les différents acteurs.

CONCLUSION

La mise en évidence de la nécessité de prendre en compte les effets de bord associés aux effacements de consommation a montré l'importance de disposer d'études qualitatives et quantitatives de référence permettant de mieux appréhender l'impact de ces phénomènes sur le système électrique, et le cas échéant d'étayer et de mettre en œuvre un cadre spécifique relatif à ces effets de bord dans les règles de marché.

C'est l'objectif de ce rapport que de présenter les travaux de RTE sur ce sujet et de contribuer à alimenter le débat public sur ces questions.

Ces travaux se sont également insérés dans un contexte de fortes attentes institutionnelles.

En effet, dans sa délibération d'approbation des règles relatives aux effacements de consommation du 17 décembre 2014, la Commission de régulation de l'énergie avait insisté sur le caractère prioritaire des travaux relatifs à l'évaluation du report de consommation. En particulier, la CRE avait indiqué que les résultats devraient permettre d'identifier les modalités adaptées de prise en compte du report de consommation dans les règles de marché (une prise en compte est-elle nécessaire car l'impact des effets de bord est significatif ? cette prise en compte doit-elle être normative ? dans ce cas, quel taux normatif et quelle forme normative de report retenir ?).

Dans le même temps, les discussions parlementaires sur le projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte se sont portées sur la capacité des effacements de consommation à constituer une solution efficace en matière de sobriété énergétique, leur capacité à entraîner à terme des modifications de comportement pour chaque consommateur, leur capacité à apporter une plus-value en matière d'informations pour le consommateur.

C'est ce qui a conduit le législateur à placer au cœur du cadre de régulation de l'effacement de consommation l'économie d'énergie réalisée par le consommateur suite à l'action de l'opérateur d'effacement et la Ministre de l'énergie à mandater RTE pour préparer la déclinaison de ce nouveau cadre législatif.

Un travail complexe et des positions tranchées ont mis en évidence l'importance de disposer d'une trame d'analyse commune

Début 2015, les positions des acteurs étaient divergentes quant à la qualification du phénomène de report de consommation. À titre d'exemple pour les effacements réalisés sur du chauffage électrique dans le secteur résidentiel, les valeurs proposées par les opérateurs d'effacement allaient de 0 à 100 %. Ces valeurs étaient présentées sur la base de méthodes d'évaluation et de conventions de calcul différentes, ce qui complexifiait – voire rendait impossible – la comparaison des taux de report annoncés par les différentes parties prenantes.

Ce contexte souligne la complexité des travaux entrepris début 2015 sur le report de consommation. Cette complexité a par ailleurs été renforcée par les enjeux réglementaires et économiques associés à ces travaux dans le cadre de la préparation de la déclinaison du nouveau cadre législatif.

RTE s'est donc attaché à réaliser les études sans *a priori*. Les travaux se sont notamment concentrés sur la catégorie d'effacements pour laquelle il existait une réelle incertitude sur l'existence ou non d'économies d'énergie significatives et sur le taux associé à cette économie d'énergie : les effacements réalisés sur du chauffage électrique dans le secteur résidentiel.

RTE a conclu des conventions de test avec des opérateurs d'effacement, spécialistes de ce domaine d'activité et a choisi de compléter ces analyses expérimentales avec des simulations théoriques réalisées par le CSTB. Ces travaux sont complémentaires : les expérimentations permettent de proposer des taux de report de consommation dans le cadre de la déclinaison du cadre législatif et les simulations théoriques permettent d'apporter un éclairage sur le profil du report de consommation et d'alimenter les réflexions sur la prise en compte explicite du rapport de consommation.

La plus-value des travaux présentés dans le rapport consiste notamment dans la définition d'une trame d'analyse des différentes méthodes d'évaluation de l'effacement

et du report de consommation. Cette trame d'analyse peut désormais servir de référence pour toute nouvelle méthode d'évaluation pouvant être proposé par RTE dans le cadre de sa mission de certification des effacements.

Cette trame d'analyse garantit que les taux présentés sont systématiquement associés à certains paramètres structurants (conventions de calcul utilisées, périmètres d'évaluation, durée du report considérée) et que l'analyse de sensibilité des résultats repose sur une batterie d'indicateurs statistiques appliquée de façon homogène (MAPE, MPE, bootstrap, pseudo-report). Ces indicateurs ont une importance-clé dans la lecture des résultats : ils permettent, au-delà des taux affichés, de visualiser leur dispersion et donc de représenter les marges d'incertitude associées.

À ce titre, dans les expérimentations présentées dans le rapport, les analyses de sensibilité très poussées ont été menées dans le cadre de la convention signée avec VOLTALIS, à la fois du fait du grand nombre de sites, des traitements échangés et du temps consacré à cette expérimentation. Des analyses de sensibilité du même type devront être poursuivies sur les méthodes par panels, avec EDF, ERDF et d'autres opérateurs intéressés, pour parvenir au même degré de connaissance et d'analyse.

Un taux d'économie d'énergie n'a de sens que si les paramètres entourant son calcul sont clairement définis

1. Le taux d'économie d'énergie est calculé par rapport au volume d'énergie effacée

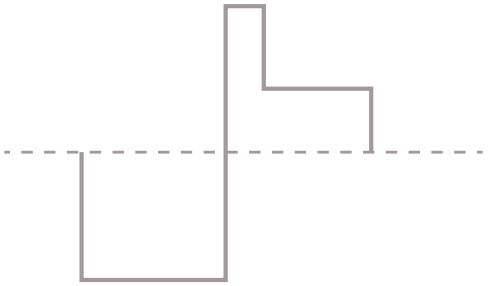
Les analyses présentées consistent ainsi à rapporter l'économie d'énergie aux quantités effacées, et ainsi à évaluer l'effet du report sur le fonctionnement du système électrique conformément aux dispositions du nouvel article L. 271-1 du Code de l'énergie.

2. Le taux d'économie d'énergie est très sensible à la définition du report de consommation

Les représentations classiques considèrent un effacement de consommation comme une baisse de la consommation immédiatement suivie d'un rattrapage rapide de celle-ci conduisant à une « surconsommation » momentanée par rapport à la consommation de référence.

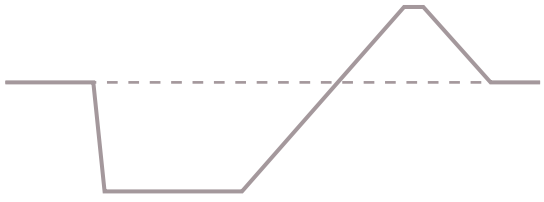
Les études menées par RTE en 2012 avaient déjà permis de montrer que le report de consommation n'était généralement pas concentré durant les premiers instants qui suivent la fin de l'action de l'opérateur, mais pouvait durer plus longtemps (au moins 8 heures). Pour autant, la représentation du phénomène demeurait fondée sur la succession d'une baisse de consommation et d'un rattrapage.

Figure 26 – Représentation d'un effacement associé d'un report immédiat



Les nouveaux résultats présentés dans le rapport pour ce qui concerne l'effacement du chauffage électrique résidentiel amènent à compléter ce schéma traditionnel. En particulier, le profil type de déformation de la courbe de charge associé à un effacement est souvent bien plus complexe : à l'issue de l'action de l'opérateur d'effacement, le redémarrage de la consommation peut être lent, et ainsi conduire à décaler dans le temps le rattrapage de consommation. Ce phénomène semble en réalité « normal » et peut s'apparenter aux pentes qui caractérisent le profil d'injection de certains groupes de production. Les expérimentations ont à cet égard révélé que la représentation « commune » du report de consommation était en fait trop simpliste par rapport à la réalité du phénomène.

Figure 27 – Représentation d'un effacement associé à un report de consommation différé



Dès lors, les questions de comptabilité du volume d'effacement et du volume de report de consommation prennent une importance accrue.

Une première comptabilité consiste à évaluer l'effacement de consommation comme l'intégralité de la diminution de consommation constatée (par rapport à la consommation « normale » du consommateur), et le report de consommation comme l'intégralité de la surconsommation constatée (là encore, par rapport à sa consommation « normale ») dans la période suivant l'effacement. On parlera dans ce cas de convention de calcul fondée sur les *baisses de consommation constatées*.

Une seconde comptabilité définit l'effacement de consommation et le report de consommation par rapport à la seule durée d'action de l'opérateur d'effacement sur les sites. Sont alors comptabilisés comme report de consommation les phénomènes mesurés dès l'achèvement de l'ordre d'effacement, et non au moment du démarrage effectif du phénomène de surconsommation par rapport à la consommation normale du site. Avec cette convention de calcul, dans le cas où la diminution de consommation par rapport à la courbe de référence se poursuit au-delà des ordres d'effacement transmis par l'opérateur, le volume d'énergie économisé jusqu'au démarrage effectif du phénomène de surconsommation est comptabilisé comme un report de consommation « négatif ». On parlera alors de convention de calcul fondée sur les *ordres d'effacement*.

Les exemples présentés dans le rapport montrent que les évaluations du report peuvent être extrêmement différentes selon que l'on utilise l'une ou l'autre de ces conventions de mesure. Certains résultats expérimentaux peuvent ainsi conduire lieu à des différences de 30 points entre les taux de report.

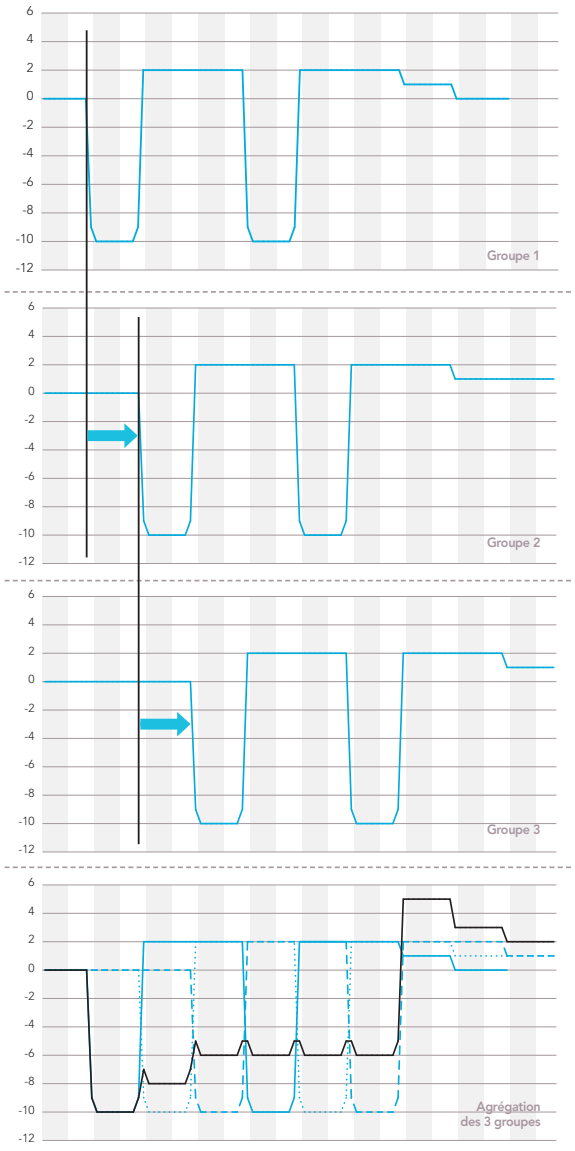
Dans le rapport, les résultats obtenus avec les deux conventions de mesure sont présentés.

3. Le taux d'économie d'énergie diffère en fonction du périmètre d'évaluation (un consommateur ou un ensemble de sites)

Les effacements de consommation valorisés sur le système électrique sont le plus souvent le résultat d'une agrégation d'effacements unitaires. Cette agrégation est géographique (de manière à disposer d'un volume important en sommant des effacements individuels de faible puissance) mais aussi temporelle (une succession d'effacements individuels courts permet d'obtenir un effacement long vu du système électrique). Dans le secteur résidentiel, un procédé classique consiste ainsi à faire s'effacer des sites les uns après les autres : il s'agit d'un effacement tournant, ou encore cascado-cyclique (les effacements réalisés ne sont pas réalisés de manière synchrone : pendant qu'un groupe de site s'efface, l'autre peut reprendre sa consommation).

Or, à économies d'énergies inchangées, ces modalités d'agrégation influent fortement sur le calcul des taux de report. Pour évaluer le taux de report associé à l'effacement agrégé, il n'est dès lors plus possible de procéder à une simple moyenne des taux unitaires.

Figure 28 – Exemple d'effacements réalisés à partir de 3 groupes tournants



D'un point de vue quantitatif, les effets associés peuvent être majeurs. Sur un exemple théorique simple, on montre que les écarts entre les taux constatés au niveau de chaque groupe ou de l'agrégat peuvent être de l'ordre de 25 points. Dans les cas constatés dans certaines expérimentations, les taux varient effectivement du simple au double. Ce phénomène est loin d'être anecdotique, c'est au contraire un paramètre dimensionnant pour la déclinaison du cadre de régulation des effacements de consommation.

En effet, la déclinaison de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte prévoit la mise en place d'un régime de versement dérogatoire pour les effacements entraînant des économies d'énergie significatives pour chaque consommateur. Pour ces catégories, elle prévoit un régime de versement assis sur l'économie d'énergie réalisée par *chaque* consommateur pour chaque effacement. L'approche requise consiste alors à rechercher des économies d'énergie par site et donc à disposer de taux unitaire défini pour un client moyen.

Au contraire, la prise en compte explicite des effets de bord dans les règles de marché nécessite une évaluation de ces effets au périmètre de la capacité valorisée sur les marchés. C'est l'évaluation au niveau de l'agrégat, par responsable d'équilibre, qui doit alors prévaloir.

Le cadre réglementaire mêle donc les deux types d'évaluation. RTE alerte sur la confusion qui en résulte dans le débat public et sur la complexité associée en matière de déclinaison opérationnelle.

Proposition pour la déclinaison du cadre législatif relatif aux effacements

Les travaux réalisés en 2015 apparaissent suffisants pour décliner le nouveau cadre législatif de valorisation des effacements.

En ce qui concerne l'application du régime de versement dérogatoire, RTE considère que :

- Dans le secteur de l'effacement industriel : en l'absence d'économie d'énergie significative, le régime de versement dérogatoire ne semble pas pouvoir être retenu.
- Dans le secteur de l'effacement tertiaire : aucun élément attestant de l'existence d'économies d'énergie significative n'ayant pu être mis à jour, le régime de versement dérogatoire ne semble pas pouvoir être appliqué en l'état.
- Dans le secteur de l'effacement résidentiel : des économies d'énergie semblent caractérisées (rapportées à la consommation effacée) en ce qui concerne le chauffage électrique. Il semble donc possible d'appliquer le régime de versement dérogatoire.

Dans ce dernier cas, la recherche d'une valeur normative – valable pour tous les effacements résidentiels sur le chauffage électrique – pourrait conduire à un taux unitaire de 50 % basé sur les baisses de consommation constatées, sur une durée d'observation de 24 h. D'autres interprétations sont possibles et peuvent conduire à des chiffres différents : RTE les a présentées dans le rapport.

Cette proposition est cohérente avec les résultats des évaluations réalisées par RTE et les opérateurs d'effacement. À ce jour, il s'agit des seuls éléments expérimentaux portés à la connaissance de RTE et permettant de réaliser une évaluation empirique du taux de report. Cette proposition de taux constitue un minorant par rapport aux résultats issus des simulations théoriques réalisées par le CSTB. Enfin, RTE rappelle que ce taux d'économie d'énergie associé aux effacements de consommation doit s'entendre au sens de l'article 168 de la loi relative à la transition énergétique et ne correspond donc pas à la quantification de la contribution de l'effacement au potentiel de sobriété énergétique.

Comme pour toute approche normative, la valeur retenue devrait alors être prise avec d'extrêmes précautions, et considérée comme un ordre de grandeur qui ne cherchent pas à représenter finement l'ensemble des cas particuliers (dépendant des modes opératoires ou des circonstances de l'effacement : moment de l'effacement, type de chauffage effacé, caractéristiques de consommation propres aux sites).

Ces éléments sont donnés sans préjudice de la faculté pour les autorités de s'écarter de ces propositions.

Proposition pour la prise en compte du report de consommation dans les règles

RTE considère qu'il n'est pas possible de retenir des coefficients normatifs et une prise en compte physique du report liés aux effacements industriels dans les

mécanismes de marché. En effet, les taux et le moment du report varient en fonction du process industriel mais aussi du carnet de commande de chaque industriel.

RTE propose donc de prioriser les travaux permettant de prendre en compte « au cas par cas » le report de consommation, c'est-à-dire de permettre un pilotage du report par les industriels ou leurs opérateurs d'effacement. Plusieurs opérateurs se sont montrés intéressés pour signer des conventions afin d'étudier des pistes de travail sur le sujet.

En l'absence de retour d'expérience fiable, RTE considère qu'il n'est pas possible de prévoir une prise en compte normative et physique du report de consommation dans les règles de marché pour les sites tertiaires.

RTE propose de poursuivre les travaux dans le cadre de conventions avec les industriels du secteur le souhaitant pour d'une part développer les connaissances théoriques nécessaires à une meilleure compréhension des caractéristiques des effacements tertiaires, et d'autre part partager des analyses concernant des résultats expérimentaux permettant à terme d'envisager une évolution des règles de marché.

Dans le secteur résidentiel, un traitement « au cas par cas » semble difficilement envisageable à ce stade, ce qui plaide donc pour une prise en compte normative. Cependant, le report dépend très fortement des modalités d'agrégation et des conventions retenues, ainsi que du profil de report. Il existe donc de réelles difficultés à mettre en œuvre une telle prise en compte normative et à garantir qu'elle conduit effectivement à une amélioration des équilibres (physiques et financiers) pour les responsables d'équilibre. Il s'agit notamment de déterminer le profil de report, le taux de report appliqué aux capacités agrégées, etc. RTE attire donc l'attention des pouvoirs publics sur cette complexité et appelle à la mise en place d'une solution proportionnée aux enjeux.

Des études économiques permettent de quantifier l'impact pour la collectivité et pour les fournisseurs d'une mauvaise définition du taux de report

Du fait des marges d'incertitude associées aux taux présentés et des débats qui continuent d'entourer l'interprétation des résultats, les éléments exposés dans le rapport ne conduisent pas à disposer à coup sûr d'une valeur de référence pour la quantification du report. Dès lors, il apparaît légitime d'évaluer les conséquences qu'entraînerait la fixation de taux normatifs différents des taux réels, sans préjuger de ces derniers.

Il ressort de nouvelles études réalisées par RTE que le choix d'un taux réglementaire de 50 % semble de nature à minimiser l'écart entre le placement optimal et le placement effectif des effacements de consommation sur les marchés. Autrement dit, exposés à une réglementation qui prévoirait une prise en compte explicite du report à hauteur de 50 % pour les effacements valorisés sur les marchés (et donc à une maille agrégée), les opérateurs d'effacement seraient incités à placer leurs ordres d'effacement à des moments ne conduisent pas à une perte de valeur collective significative sous les hypothèses testées.

Du point de vue redistributif, l'impact pour le couple {RE ; fournisseur}, de l'absence, aujourd'hui, de prise en compte explicite du report dans les règles peut être estimé mais présente des incertitudes selon l'hypothèse sur le coût d'approvisionnement (prix de règlement des écarts, prix spot) pour le fournisseur de l'énergie supplémentaire consommée par ses clients pendant le report. Cet impact est plutôt négatif en estimation médiane (le couple {RE ; fournisseur} gagnerait à ce que le report soit pris en compte explicitement), mais demeure assez faible le cas échéant (1 €/MWh), notamment si on compare son ordre de grandeur à celui du prix de versement (environ 44 €/MWh en moyenne). De surcroit, dans la situation actuelle (quand l'analyse est limitée à l'historique 2015), cet impact est encore réduit, voire inversé, par le niveau exceptionnellement bas des prix actuels.

Les travaux doivent être poursuivis dans une optique d'améliorer et d'affiner la participation des effacements de consommation au marché

1) Utiliser systématiquement le cadre d'analyse du rapport pour les futurs travaux de quantification

Aucun chiffre n'a de sens s'il n'est pas associé à des précisions concernant la convention de calcul et le périmètre d'évaluation retenus. RTE attire l'attention des pouvoirs publics sur l'importance de ces définitions dans le cadre de l'élaboration de taux d'économie

d'énergie, sur la confusion qui en résulte dans le débat public et sur la complexité qu'elles engendrent, et continueront d'engendrer, pour tous les acteurs.

À cet égard, et au-delà des valeurs proposées, les travaux réalisés dans le cadre du rapport ont permis d'établir une trame d'analyse de référence permettant de comparer les résultats et d'analyser la sensibilité des méthodes d'évaluation des effacements.

RTE plaide pour que tout futur résultat relatif à la quantification du report soit évalué sur la base du cadre d'analyse présenté dans le rapport.

2) Poursuivre l'analyse de sensibilité des méthodes décrites dans le rapport

Pour certaines méthodes (notamment la méthode des panels, les travaux menés avec DIRECT ENERGIE, ou les études envisagées sur l'effacement tertiaire), les travaux ne sont pas terminés. RTE est prêt à les poursuivre en appliquant l'intégralité des principes présentés dans le rapport à toutes les méthodes d'évaluation pouvant à terme être proposées dans le cadre de la certification des effacements.

À l'issue des analyses et quelle que soit la méthode, il ne doit plus subsister aucune « boîte noire » pour RTE, au titre de l'article L. 321-15-1 du Code de l'énergie. RTE ne proposera la mise en place d'aucune méthode, qu'elle porte spécifiquement sur l'évaluation du report ou généralement sur la certification des effacements, sur laquelle il n'aura pas réalisé de validation statistique et d'analyse de sensibilité détaillée des différents paramètres. Cela risquerait d'introduire une différence de traitement entre les acteurs de marché.

Enfin, l'analyse de ces méthodes ne pourra être poursuivie au même rythme. Un hiver de test supplémentaire sera dans tous les cas nécessaire. Leurs conclusions ne pourront être apportées avant le second semestre 2017.

3) Mettre la priorité sur la mise à jour des méthodes de contrôle du réalisé

Les travaux présentés dans le rapport étant considérés comme un préalable à la mise en œuvre du nouveau cadre législatif, ils ont été conduits de manière prioritaire. Néanmoins, leur caractère chronophage a conduit à mettre au second plan d'autres réflexions importantes dans le cadre de la bonne intégration des effacements au marché. Parmi celle-ci figure la mise à jour et le développement des méthodes de certification (contrôle du réalisé). À ce titre, les méthodes « site à site », basées sur des panels, ou toute autre méthode statistique de prévision de la courbe de référence, devront être étudiées en priorité. RTE propose d'y consacrer des efforts soutenus au cours de l'année 2016.

4) Faciliter la transmission à RTE des données nécessaires aux études

Les travaux sur l'évaluation des effets agrégés de l'effacement résidentiel peuvent être rendus plus complexes par la difficulté d'accéder à certaines données unitaires. RTE, responsable au titre de la loi de la certification des effacements, demande à ce que l'ensemble des parties prenantes (opérateurs de flexibilité, fournisseurs, gestionnaires de réseau de distribution) favorisent la transmission rapide de données unitaires, et à ce que le nouveau cadre réglementaire et les règles prises en son application permettent cet échange fluide de données, tout en respectant les meilleures pratiques en matière de protection des données individuelles.

5) Chercher à quantifier par un autre moyen les économies d'énergie

Les travaux réalisés en 2015 conduisent à mieux comprendre les conséquences de l'effacement résidentiel sur le chauffage électrique. Il ne conduit généralement pas à un report immédiat, mais diffus ; selon les situations, il conduit à des profils de reprise immédiate ou différée de la consommation ; les taux de report sont influencés par de multiples paramètres.

Il est peu probable que de nouvelles analyses statistiques telles que celles présentées dans le corps du rapport, aussi fouillées soient-elles, puissent conduire à dissiper totalement les incertitudes qui entourent les résultats présentés : à partir de quelques heures après l'effacement, les courbes de référence et de consommation constatée sont très proches, et des écarts même minimes peuvent conduire à des appréciations très différentes. Tant de paramètres jouent sur la consommation d'un site qu'il devient alors très difficile d'isoler l'influence des effacements de consommation. Cela justifie l'importance accordée dans le rapport à la présentation d'intervalles de confiance autour des résultats obtenus.

Sur la base des éléments présentés dans le rapport, il semble néanmoins que des pistes de travail existent

en matière de modélisation des échanges thermiques résultant d'effacements très courts, dans des régimes potentiellement non stationnaires. Un programme de travail, relevant plutôt de la recherche et développement, pourrait ainsi consister à examiner l'effet d'effacements de durée brève du chauffage tels que les effacements diffus sur les transferts de chaleur au sein d'un logement ou avec les sites adjacents, sur la température mesurée et l'éventuelle perte de confort qui en résulte pour l'usager. De manière générale, il semble nécessaire d'approfondir la connaissance du parc de logements susceptibles de participer aux effacements résidentiels de chauffage électrique, le comportement des occupants en matière de pilotage de la température, le confort attendu afin de mieux caractériser les économies d'énergie possibles.

Une telle étude pourrait rejoindre d'autres prolongements possibles et discutés portant sur la contribution de l'effacement résidentiel aux politiques de sobriété énergétique. Les questions spécifiques porteraient alors sur l'effet sur le potentiel d'effacement résidentiel de facteurs comme le type de programmation utilisé dans les installations de chauffage, les programmes de rénovation thermique des logements ou d'information des consommateurs ou de renouvellement du parc actuel de radiateurs électriques, ou le déploiement de dispositifs d'information des consommateurs comme les compteurs communicants. RTE se tient prêt à y contribuer.

6) Poursuivre les études économiques associées au nouveau cadre de valorisation des effacements

Le rapport permet de caractériser l'ordre de grandeur des enjeux associés à la prise en compte explicite du report, pour la collectivité et pour certains acteurs.

Bien sûr, ces études dépendent des prix de marché et pourraient être régulièrement actualisées. D'autres pistes de travail semblent néanmoins tout autant importantes :

- les conséquences de l'application du régime du versement dérogatoire, en matière de placement des effacements, d'impact sur les prix de marché et de conséquences sur les fournisseurs ;
- l'intérêt de l'effacement comme solution de sobriété énergétique, comparé à des solutions alternatives.

ANNEXE 1
ÉVALUATION DES EFFETS DE BORD ET DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE PAR LA MÉTHODE DU TÉMOIN ÉPROUVÉ DYNAMIQUE (TED) ET VARIANTE

La méthode proposée par la société VOLTALIS et testée dans le cadre d'une convention VOLTALIS-RTE signée le 16 février 2015 repose sur une évaluation du report par la constitution de groupes miroirs : pendant qu'un groupe s'efface, un autre groupe de sites dit témoin, dont la comparabilité est éprouvée de façon dynamique, permet de constituer la courbe de référence servant à l'évaluation du report.

L'expérimentation a reposé sur des effacements réalisés entre le 29 janvier et le 4 février 2014 de manière spécifique selon un protocole de tests prédéfini et sur une méthode d'évaluation du report. L'opérateur d'effacement a indiqué que les usages effacés correspondaient uniquement à du chauffage électrique.

La description formelle de la méthode proposée par VOLTALIS a fait l'objet d'une annexe à la convention signée le 31 mars 2015. RTE a alors pu débuter les analyses sur la base des données transmises par VOLTALIS, de la méthode proposée par VOLTALIS, ainsi que de variantes proposées par RTE. Les travaux ont donné lieu entre avril et novembre 2015 à des échanges techniques entre VOLTALIS et RTE.

1.1 Protocole de tests

L'expérimentation de la méthode TED a impliqué la réalisation d'effacements portant sur le chauffage électrique de 45000 logements résidentiels. Les logements ont été répartis en 4 paires de groupes (1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B), le groupe 1A (resp. 2A, 3A, 4A) servant de groupe miroir au groupe 1B (resp. 2B, 3B, 4B) et réciproquement. Vingt-quatre effacements ont été réalisés sur 7 jours consécutifs allant du 29 janvier 2014 au 4 février 2014. Le tableau ci-dessous définit pour chacun des groupes l'heure de début des effacements.

Tableau 8 – Protocole de test pour la méthode TED – heures des effacements réalisés sur chaque groupe

	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5	Jour 6	Jour 7
1A	20h00		22h00			00h00	
1B		21h00		23h00			1h00
2A		02h00		04h00		06h00	
2B			03h00		05h00		07h00
3A		8h00		10h00		12h00	
3B			9h00		11h00		13h00
4A		14h00		16h00		18h00	
4B			15h00		17h00		19h00

Ainsi chaque paire donne lieu à 6 effacements et chaque groupe au sein d'une paire donne lieu à 3 effacements et constitue 3 fois le groupe témoin de l'autre groupe.

Le protocole retenu vise à respecter les conditions suivantes :

- deux séquences d'effacement sur un groupe de sites sont séparées par une durée suffisamment longue (48 h + 1 h entre deux séquences d'effacements réalisées sur un même groupe) ;
- lorsqu'un groupe d'une paire sert de témoin pour l'autre groupe, il est lui-même au repos (i.e aucun ordre d'effacement ne lui a été adressé) depuis 24 h ;
- les effacements sont répartis sur toutes les heures de la journée.

Par ailleurs, tous les effacements sont réalisés selon le même schéma : ils sont constitués de trois effacements unitaires de 10 minutes séparés par une période de repos de 20 minutes.

Les groupes ont été constitués par VOLTALIS selon les principes suivants :

- les sites ont tout d'abord été répartis entre 4 ensembles de manière aléatoire ;
- chaque ensemble a ensuite été segmenté en deux groupes de manière à obtenir des consommations sur une période de repos de 24 h les plus proches possibles (minimisation des écarts quadratiques entre les consommations des deux sous-groupes sur une période de repos de 24 heures).

Aucun autre critère n'a été utilisé pour l'affectation des sites dans les différents groupes.

Dans le cadre des tests, RTE a eu accès aux données de consommation par site correspondant aux 8 jours (29 janvier au 5 février 2014) ayant donné lieu à des périodes post-effacement, ainsi qu'à 2 jours (22 et 23 janvier 2014) à plus de 24 heures du dernier effacement et pendant lesquels aucun ordre d'effacement n'a été envoyé aux sites (période de repos).

Pour chaque effacement réalisé, les comportements du groupe de sites effacés et de son témoin sont observés sur les périodes suivantes :

- une période de 4 heures antérieure à l'effacement (dite « période de tête »), considérée comme une période de repos (non influencée par un ordre d'effacement) ;
- la période d'effacement de 1 h 30 (composée elle-même de 3 séquences avec un ordre d'effacement de 10 minutes et une période de repos de 20 minutes) ;
- une période postérieure à l'effacement pendant laquelle les effets de bord sont évalués ; la durée de cette période a d'abord été fixée à 8 heures.
- une période ultime de 4 heures (dite « période de queue ») pendant laquelle les sites sont à nouveau considérés comme étant au repos.

Figure 29 – Schéma retenu pour les ordres d'effacements

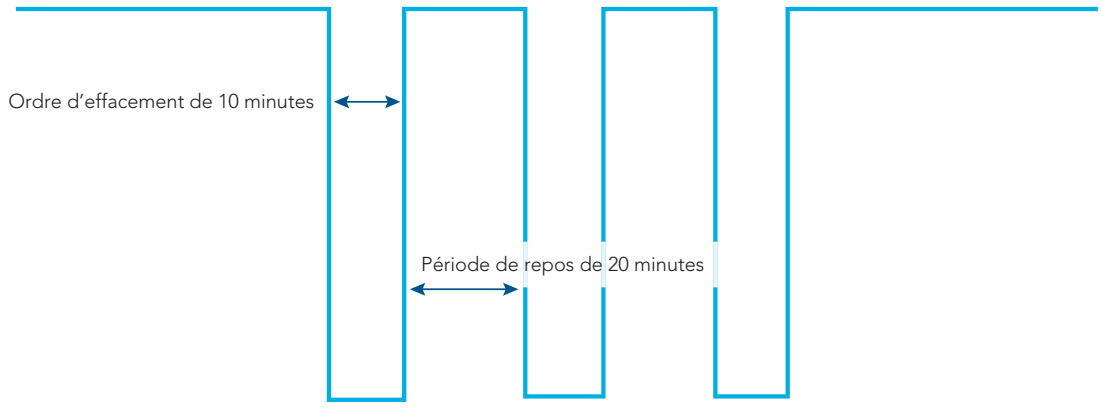
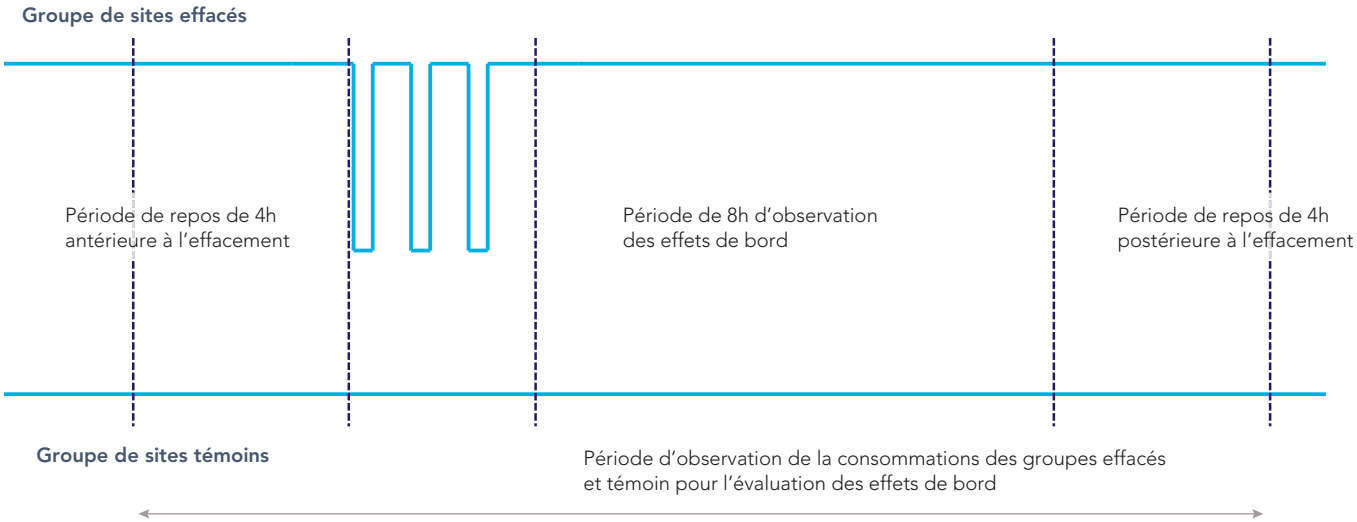


Figure 30 – Les différentes périodes définies pour l'évaluation des effets de bord



La figure ci-dessous représente les différentes périodes définies pour évaluer les effets de bord avec la méthode TED. Par la suite, un bloc désigne une telle période ainsi constituée.

À chaque effacement est ainsi associée une période d'observation de 17 h 10 encadrant l'effacement pendant laquelle les consommations des deux groupes constitutifs d'une même paire vont être comparées.

Les données de consommation utilisées (données à un pas de 10 minutes) pour l'évaluation du report sont celles de l'opérateur d'effacement. Elles n'ont pas donné lieu, dans le cadre de ce protocole, à des contrôles spécifiques de la part de RTE.

1.2 Méthode pour l'évaluation des économies d'énergie proposée par VOLTALIS

La méthode d'évaluation du témoin éprouvé dynamique (TED) repose sur trois étapes distinctes :

- un traitement des données visant à s'assurer de leur fiabilité : complétude et pertinence du témoin par rapport au groupe effacé ;
- le calage de la consommation des sites du groupe témoin sur celle du groupe de sites effacés ;
- l'évaluation proprement dite des volumes de report, des taux de report et d'économie d'énergie.

1.2.1 Traitement préalable des données

La méthode TED comprend les traitements de données suivants :

1. suppression des sites ayant un taux d'acquisition inférieur à 90 % sur la période d'intérêt (la mesure de consommation est disponible sur au moins 90 % des pas de temps 10 minutes de la période d'étude) ;
2. suppression des sites ayant deux valeurs manquantes successives ;
3. suppression des sites ayant une consommation nulle juste avant l'envoi de l'ordre d'effacement ;
4. reconstitution des valeurs manquantes isolées par interpolation entre la valeur du pas de temps précédent et du pas de temps suivant ;
5. suppression des sites ne réagissant pas à l'ordre d'effacement, c'est-à-dire avec une variation de consommation inférieure à 20 % avant et après l'envoi d'un ordre d'effacement ;
6. suppression des sites ayant des médianes de consommation sur des périodes avant (pendant 4 heures précédant l'effacement) et après l'effacement (pendant une période comprise entre 8 heures et 12 heures après l'effacement) inférieures à 50 W.

Les traitements 1, 2 et 4 concernent les valeurs manquantes dans les mesures de consommation des sites ; ils sont destinés à être appliqués de manière identique sur le groupe de sites effacés et sur le groupe témoin. La méthode consiste, pour chaque site, dans le cas où la valeur de consommation est

manquante, à la remplacer par les valeurs proches (pas de temps précédent et suivant). Cela suppose que les valeurs encadrantes constituent effectivement une bonne information pour estimer la valeur inconnue : c'est ce qui a conduit à ne pas considérer au préalable les sites présentant plusieurs valeurs manquantes successives.

Les traitements 3, 5 et 6 visent à exclure certains sites en fonction de leur comportement avant, pendant ou après l'effacement. Plus précisément, les troisième et sixième points concernent le comportement des sites avant et après l'effacement ; ils sont destinés à être appliqués de manière identique sur le groupe de sites effacés et sur le groupe témoin. Le cinquième point concerne le comportement des sites pendant l'effacement, il ne peut être appliqué que sur le groupe de sites recevant des ordres d'effacement.

Une fois ces traitements préalables réalisés, les consommations des sites appartenant à un groupe donné sont additionnées de façon à disposer pour chaque effacement de la consommation du groupe témoin et de la consommation du groupe effacé (consommation agrégée des sites constitutifs des groupes).

1.2.2 Calage du témoin éprouvé dynamique

La méthode TED repose sur une comparaison entre la consommation d'un groupe effacé d'une part et celle d'un groupe témoin d'autre part, pour chaque effacement et pour chaque paire de groupes constituée (un groupe est tour à tour effacé puis témoin de l'autre groupe constitutif de la même paire).

Pour assurer une bonne comparabilité du groupe effacé au groupe témoin et éliminer tout éventuel écart qui viendrait perturber l'évaluation du report, la méthode proposée par VOLTALIS comporte des étapes de calage des courbes du groupe effacé et du groupe témoin avant de procéder à leur comparaison :

- calage en moyenne et en variance de la consommation du groupe témoin sur celle du groupe effacé pendant les périodes de tête et de queue (pour rappel, les périodes de tête et de queue sont des périodes de 4 heures définies comme suit : la période de tête est la période de 4 heures qui précède un effacement ; la période de queue « à 8 heures » est la période comprise entre 8 et 12 h après effacement) ;
- entre ces périodes, i.e. pendant les périodes d'effacement et d'évaluation des effets de bord, la moyenne et la variance utilisées pour le calage du groupe témoin sont interpolées à partir des moyennes et variances du groupe effacé sur les périodes de tête et de queue.

1.2.3 Calcul du taux de report, résultats obtenus et incertitudes associées

La méthode d'évaluation des effets de bord proposée par VOLTALIS consiste à rapporter, au volume de l'effacement durant les ordres d'effacement, le cumul des écarts ultérieurs entre les courbes de consommation du groupe effacé et du groupe témoin. Ceci est réalisé après traitements préalables des données et calage de la consommation du groupe témoin sur celle du groupe effacé selon les modalités décrites précédemment. VOLTALIS propose ainsi de retenir un taux fondé sur les ordres d'effacement, c'est-à-dire à partir d'effacements délimités par les ordres d'effacements envoyés par les opérateurs d'effacement, et non sur les baisses de consommation constatées (fut-ce au-delà des ordres), selon les deux conventions décrites notamment à la section 1.3.4.

Les volumes d'effacement d'une part et de report d'autre part sont sommés pour les 24 effacements réalisés. Les taux de report moyens sont calculés par quotient entre ces sommes pour les 24 effacements.

$$Taux\ report = \frac{\sum_{i=1}^{24} Vrep(i)}{\sum_{i=1}^{24} Veff(i)}$$

Le taux d'économies d'énergie est le complément à 1 du taux de report :

$$Taux\ économies\ d'énergie = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{24} Vrep(i)}{\sum_{i=1}^{24} Veff(i)}$$

Sur une durée de 8 heures après l'effacement, les taux de report et d'économies d'énergie obtenus avec la méthode TED proposée par VOLTALIS et décrite ci-dessus sont de :

$$Taux\ report = 5{,}5\,\%$$

$$Taux\ économies\ d'énergie = 94{,}5\,\%$$

Ces calculs ont été vérifiés par RTE. En complément, RTE a évalué des indicateurs visant à établir de l'incertitude associée aux résultats obtenus.

• Précision de la courbe de référence obtenue avec TED
Les indicateurs de MAPE et MPE ont été évalués sur des périodes incluses dans les deux jours de repos et comparables en durée aux périodes d'observation du report (comparaison entre la courbe de référence établie avec la méthode TED et la courbe de consommation réalisée).

Les indicateurs statistiques montrent une très bonne précision de la courbe de référence et une absence de biais sur les deux jours de repos préalables aux effacements. Cependant, ceux-ci pourraient donner une estimation optimiste de la précision de la courbe de référence sur les périodes d'effacement et d'observation du report, les groupes de sites ayant été appariés sur un critère de proximité des courbes de charge pendant les deux jours de repos préalables aux effacements. De plus, si ces indicateurs statistiques sont un bon reflet de la proximité de deux séries de points, donc ici de deux courbes de charge, ils ne permettent pas d'estimer directement l'incertitude sur le report qui peut en résulter, dont le calcul provient d'une intégration de la différence entre deux courbes. Pour compléter ces résultats, RTE a donc introduit la notion de pseudo-report.

Tableau 9 – Indicateurs statistiques de qualité de la courbe de référence obtenue avec la méthode TED

	MAPE		MPE	
	Période totale d'observation	Période d'observation hors périodes de calage	Période totale d'observation	Période d'observation hors périodes de calage
Quantile 5 %	0,79 %	0,98 %	-0,16 %	-0,29 %
Moyenne	0,87 %	1,11 %	0 %	0 %
Quantile 95 %	0,94 %	1,26 %	0,15 %	0,28 %

• Pseudo-report
RTE a procédé à une évaluation de la méthode TED proposée par VOLTALIS en calculant un « pseudo-report » associé à des effacements fictifs. Le pseudo-report est évalué sur les deux jours pendant lesquels aucun ordre d'effacement n'a été adressé aux sites. Pour se rapprocher des conditions du protocole, sur ces jours, des groupes de 24 pseudo-effacements (effacements fictifs) sur les différentes paires de groupes sont tirés au hasard (100 tirages de 24 pseudo-effacements) et chaque fois le report est calculé sur la base de ces 24 effacements sur des périodes d'observation équivalentes à celles des effacements réalisés. Le taux attendu est proche de 0 puisqu'aucun effacement n'a été réalisé, le cas contraire peut révéler un biais de la méthode testée. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-contre.

Tableau 10 – Pseudo report associé à la méthode TED

	Pseudo report associé à 8 h
Quantile 5 %	-4,59 %
Moyenne	0,20 %
Quantile 95 %	4,66 %

Les taux de pseudo-report sont proches de 0 et peu dispersés. Ils ne révèlent pas d'instabilité statistique de la méthode TED.

1.2.4 Analyse complémentaire proposée par VOLTALIS

La méthode TED repose sur un calage qui vise à assurer au mieux la comparabilité de l'échantillon effacé au témoin. VOLTALIS a introduit ce calage afin d'éliminer les effets d'une éventuelle dérive de ces deux groupes pouvant intervenir, pour de tout autres raisons, entre les deux échantillons au cours de la période d'observation.

En effet, de telles dérives sont d'autant plus vraisemblables que la période est longue, et une dérive même minime aurait des effets de grande ampleur sur l'évaluation du taux de report.

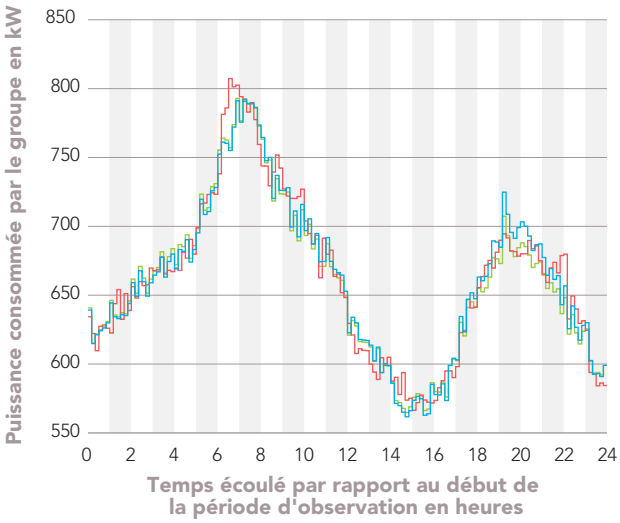
VOTLALIS a présenté un exemple qui illustre à ses yeux le risque d'une telle dérive et le fait que le calage des échantillons permet selon elle d'éviter de l'embarquer dans le calcul du report, qui s'en trouverait radicalement faussé.

Cet exemple porte sur des sites conservés au repos (sites n'appartenant au périmètre d'évaluation par la méthode TED) sur toute la période (du 22 janvier au 5 février 2014). Ces sites sont répartis en paires de groupes suivant le même procédé que pour la constitution des groupes 1A, … , 4B de TED. VOLTALIS a indiqué avoir ainsi constaté une dérive naturelle supérieure à 10 % (sur des périodes d'observation de 17 h 10). Les graphiques ci-dessous présentent cet exemple dans lequel la dérive biaise le report de 202 % (ramené à 1 % grâce au calage).

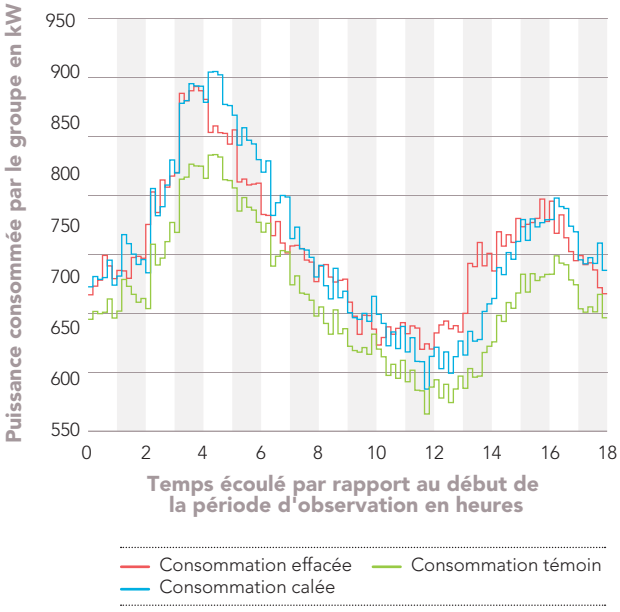
RTE, n'ayant pas eu accès aux données, n'a donc pas pu juger de la pertinence de cet exemple, portant sur d'autres sites que ceux de l'étude, ni de la méthodologie d'analyse associée. Dans le cadre de l'étude, RTE a observé que, sans recalage, si l'on observe les 4 heures précédant chacun des 24 effacements, le MAPE est en moyenne de 1,4 % et le MPE est en moyenne de 0,3 % sur ces heures. La courbe de consommation du groupe témoin a donc tendance à être légèrement supérieure à la courbe du groupe effacé, ce qui pourrait s'expliquer par un reliquat de report correspondant à des effacements réalisés la veille, et dans ce cas ne révélerait pas un éventuel phénomène de dérive des groupes. L'ordre de grandeur des écarts entre les courbes du groupe effacé et du groupe témoin est faible, et l'impact d'autant moins significatif selon RTE qu'a été fait le choix judicieux d'alterner les rôles de groupes témoins et effacés dans le protocole expérimental.

L'application d'un calage 8 heures après la fin de l'effacement présuppose que le phénomène de report de consommation ne se produit plus à cette échéance, ou du moins qu'il n'est plus significatif (dans le cas contraire, la mise en œuvre du calage ne permet plus d'évaluer le phénomène que l'on cherche à saisir). VOLTALIS a d'abord travaillé avec cette hypothèse d'un report limité à 8 heures, en s'appuyant sur les travaux antérieurs menés par RTE sur l'expérimentation « ajustement diffus » au cours de l'hiver 2011-2012, qui portaient sur une période d'observation du phénomène de report d'une durée de 8 heures. Les travaux ont ensuite montré que le report pouvait se prolonger au-delà. C'est pourquoi RTE a souhaité, dans le cadre de toutes les expérimentations décrites dans le présent rapport, élargir la période d'évaluation du report et ne pas la cantonner aux 8 heures immédiatement postérieures à l'effacement.

Figure 31 – Puissance consommée par deux groupes proches sur une période au repos
(Analyse VOLTALIS)



Deux groupes (en rouge et vert) initialement très proches (cf. ci-dessus) vont évoluer avec le temps (cf. ci-dessous) : cette dérive non corrigée conduirait à calculer un taux de report de 202 % (alors qu'aucun effacement n'a eu lieu) ; sa correction par le calage ramène ce taux à 1 % (passage de la courbe verte à la courbe bleue, beaucoup plus proche de la courbe rouge, donc constituant un meilleur témoin). *[Exemple VOLTALIS]*



VOLTALIS a donc proposé une analyse complémentaire afin d'illustrer la sensibilité de la méthode TED au calage, et d'évaluer sur cette base la durée du phénomène de report de consommation.

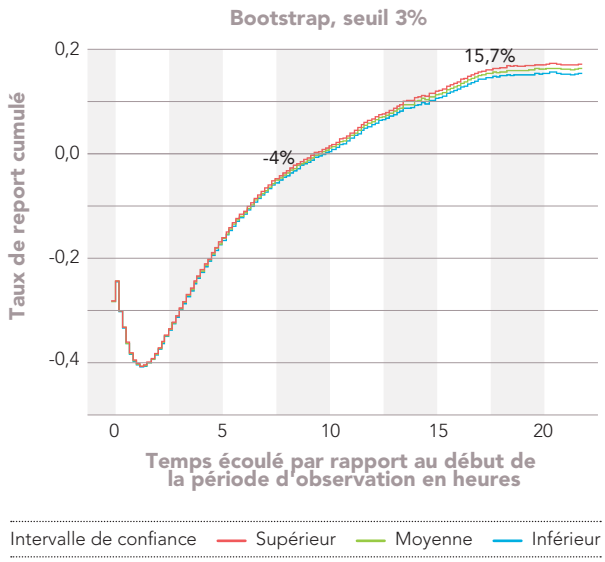
Pour ce faire, le calage a été supprimé, et la comparabilité des échantillons a été recherchée au moyen d'une méthode de bootstrap. Il s'agit de comparer le groupe

effacé et le groupe miroir[15], sans donc avoir procédé à aucun calage, mais en effectuant un rééchantillonnage avec un grand nombre de tirages aléatoires, avec pour but de faire apparaître lisiblement la tendance suivie par le report au cours des heures suivant l'effacement.

Comme l'illustre le graphique suivant, qui représente le taux de report cumulé au cours du temps après l'effacement, VOLTALIS considère que cette approche statistique sans calage suggère que le report se prolongerait plus de 8 heures après l'effacement, et tout en s'atténuant, la courbe se stabilisant vers 18h.

Selon les calculs de VOLTALIS, le report culminerait donc à 15,7% sur 18 heures (après être passé par -4% sur 8 heures).

Figure 32 – Bootstrap déterminant le taux de report moyen *(Analyse VOLTALIS)*



Le tableau ci-dessous consigne et complète les résultats annoncés dans ce paragraphe.

Selon VOLTALIS, cette approche permet de confirmer la pertinence d'une évaluation sur 18 heures, car le taux obtenu ci-dessus n'évolue pas entre 18 et 22 heures, ce qui suggère que le report est bien terminé. Les calculs permettent en effet de mettre en évidence une tendance claire : la courbe moyenne, au cours des deux dernières heures, ne croît plus que de 0,0001 (c'est-à-dire 1/100e de pourcent). Compte tenu des fluctuations naturelles de la courbe moyenne au cours des dernières heures (environ 0,001), cette valeur très faible est un indicateur fort de la stabilisation du report.

RTE ne partage pas cette analyse et considère qu'elle ne peut pas démontrer le résultat attendu, c'est-à-dire que le report est terminé au bout de 18 heures. Selon RTE, l'intervalle de confiance tracé par VOLTALIS représente l'erreur intrinsèque à la méthode du bootstrap et n'a rien à voir avec la variance de la distribution du taux de report dont on recherche une estimation. Il n'est donc en aucun cas possible de rapprocher (a) l'intervalle de confiance du bootstrap proposé par VOLTALIS illustré par la Figure 32, qui, bien que correct, ne répond pas à une autre question que la quantification de l'erreur due au bootstrap lui-même et (b) l'intervalle de confiance déterminé par RTE, qui entend pour sa part répondre à la question de la précision de l'étude TED aux différents horizons temporels. De plus, RTE considère en outre que la déclinaison de la méthode choisie par VOLTALIS n'a pas été réalisée selon les mêmes standards statistiques, et ne souhaite ainsi se baser ni sur le report moyen estimé par le bootstrap de VOLTALIS, ni sur l'intervalle de confiance.

Tableau 11 – Résultats de TED et du bootstrap (Analyse VOLTALIS)

	5h	8h	10h	18h
TED	-2,6%	5,5%	NA	NA
Bootstrap	-17,2%	-4,0%	0,8%	15,7%

15. Par précaution, un critère de seuil à 3% a été choisi afin d'éviter la comparaison de groupes d'emblée trop différents. Ce critère n'a conduit qu'à éliminer deux blocs. Sans ce critère, le taux de report s'établit à 15% au terme de 18h et -6,1% après 8h.

1.3 Analyses de RTE et variantes de la méthode TED

Dans le cadre de la convention conclue entre VOLTALIS et RTE le 16 février 2015, RTE a procédé à une analyse de la méthode TED pour la détermination du report de consommation. Cette évaluation consiste à mener des tests et une contre-analyse de la méthode, de manière à en confirmer la robustesse ou, le cas échéant, à en proposer des aménagements. L'objet des analyses menées par RTE est également, comme le précisent les conventions conclues en application de l'article 8.3.5 des règles NEBEF du 19 décembre 2014, de statuer sur la généralisation possible des résultats, en matière de contrôle du réalisé ou d'évaluation normative des effets de bord.

Les résultats associés ont fait l'objet de discussions entre VOLTALIS et RTE. La présente partie présente l'analyse de RTE sur la méthode TED. Les variantes proposées, et les interprétations exposées, sont de la seule responsabilité de RTE.

De manière générale, les indicateurs utilisés pour évaluer la méthode et présentés ci-dessus (MAPE, MPE, pseudo-report, bootstrap) montrent des résultats robustes et satisfaisants. Les indicateurs moyens sont proches de zéro et ils sont faiblement dispersés sur l'ensemble des tirages. Ces bonnes performances sont notamment liées au nombre très significatif de sites engagés dans l'expérimentation, ce qui permet d'assurer une bonne représentativité statistique. Ainsi, du fait du protocole de tests spécifique mis en place et du nombre de sites impliqués dans l'expérimentation, la méthode TED permet d'obtenir des résultats robustes d'un point de vue statistique.

Cette base étant acquise, RTE a mené des analyses complémentaires pour mettre en évidence l'impact des choix inhérents à la méthode présentée par VOLTALIS sur l'évaluation du report, et mettre en débat la possibilité que certains de ces choix puissent conduire à des biais ne pouvant être captés par les indicateurs présentés ci-dessus. Cette contre-analyse a conduit RTE à élaborer par étape une variante de la méthode TED et à comparer les résultats de cette variante avec ceux résultant de la méthode initiale.

Les analyses de RTE ont plus spécifiquement porté sur trois points, qui sont détaillés dans la suite du § 1.3 :

- la pertinence de certains traitements préalables des données présentés par VOLTALIS dans la méthode TED : à l'issue des discussions, RTE considère que la pertinence de certains traitements n'est pas démontrée, et que ces traitements ne devraient pas être mis en œuvre dans la méthode d'évaluation du report. Néanmoins, les résultats ne diffèrent pas significativement selon qu'ils résultent de la méthode TED ou de la variante élaborée par RTE ;
- la pertinence de l'application d'un calage au bout de 8 heures : à l'issue des discussions, RTE considère que ce calage aboutit à une vision tronquée du phénomène de report. RTE a alors proposé une variante basée sur la suppression du calage et un traitement en moyenne de la consommation des sites. Cette variante permet de prolonger l'évaluation du report au-delà de 8 heures après la fin de l'effacement, sur toute la période d'observation possible de 22 heures après les effacements, et ainsi de mieux saisir la réalité du phénomène observé. VOLTALIS, selon qui le traitement en client moyen présente d'autres inconvénients significatifs, a proposé deux autres approches pour dépasser l'objection de RTE sur le calage à 8 heures, l'un étendant la période d'observation avant calage à 18 heures (variante TED[acq] qui aboutit au taux de report de 19,5% – cf. section 1.4 ci-après) ; l'autre supprimant tout calage (ce qui mène au bout de 22 heures, au taux de report de 18% selon VOLTALIS). Il en résulte une différence significative entre les taux calculés dans la méthode initiale et ceux que permettent d'obtenir la variante proposée par RTE ou les chiffrages complémentaires par VOLTALIS, mais cette différence n'apparaît pas de nature à modifier l'appréciation qualitative générale portée sur le phénomène de report ;
- la convention utilisée pour délimiter le volume d'effacement, soit uniquement pendant les ordres d'effacement adressés par l'opérateur d'effacement, soit aussi au-delà, et ainsi la définition même du taux de report : à l'issue des discussions et alors qu'il n'existe pas de norme consensuelle sur la définition du report et sur la façon d'en tirer un jugement sur les économies d'énergie, les chiffres correspondant à chacune de ces deux conventions sont présentés. Sur l'exemple considéré, selon que le taux de report est exprimé avec l'une ou l'autre de ces deux conventions, une différence très nette apparaît, supérieure à celle qui résulte des discussions sur les traitements préalables de données ou sur le calage. Cette différence interpelle dans la mesure où les deux conventions entendent mesurer une réalité physique unique.

Le premier de ces trois points porte notamment sur la question du traitement des valeurs manquantes (valeurs

non renseignées dans les courbes de consommation). Cette question étant revenue à plusieurs occasions dans les échanges entre RTE et VOLTALIS, RTE a comparé différentes options possibles ainsi que décrit ci-après.

Dans la suite de l'annexe, RTE présente l'impact sur les taux de report obtenus de chacune des évolutions proposées, afin de permettre d'appréhender la sensibilité des résultats. In fine, les résultats associés à la variante retenue par RTE sont présentés.

1.3.1 Traitements préalables des données

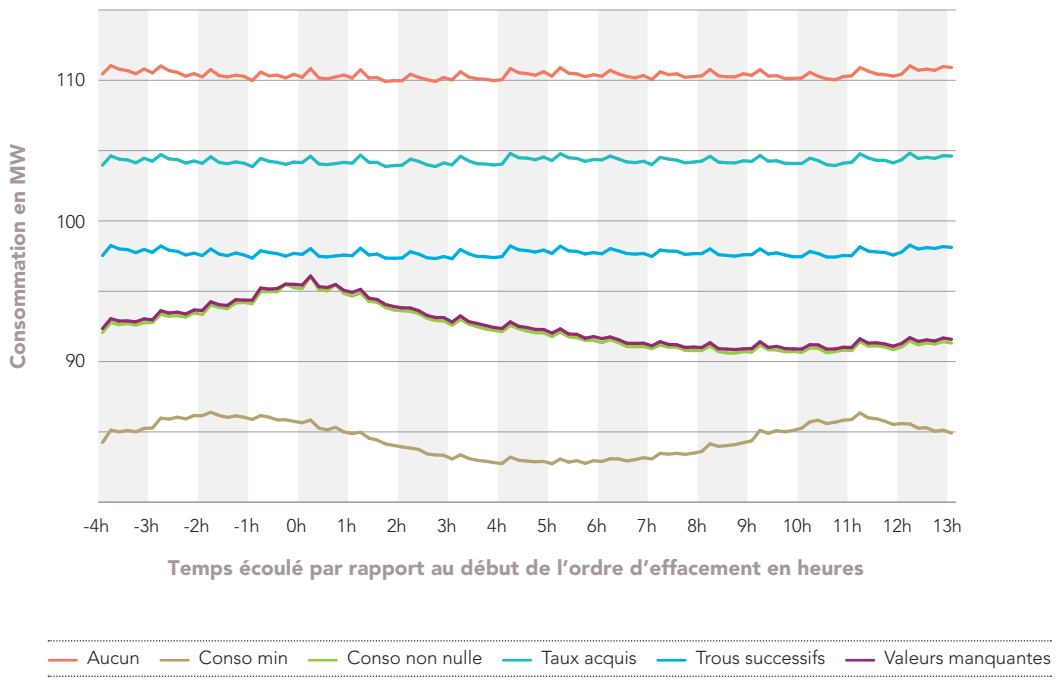
La méthode TED repose, comme toute méthode statistique, sur certains traitements préalables des données. L'objet des conventions conclues entre RTE et un opérateur d'effacement comme VOLTALIS est justement de permettre une discussion contradictoire sur l'intérêt de ces traitements.

Ainsi, comme décrit à la section 1.2.1, aux groupes constitués par VOLTALIS sont appliqués six traitements ou plus exactement six cribles destinés selon VOLTALIS à en renforcer la robustesse statistique. À l'exception du traitement 5 qui n'a de sens que sur les groupes effacés, tout traitement appliqué à un groupe est appliqué à son groupe miroir. Partant d'un groupe initial, on obtient, par application des traitements successifs, cinq groupes inclus les uns dans les autres, de plus en plus ciblés pour parvenir à des résultats robustes selon VOLTALIS. Quatre de ces cinq traitements consistant à cibler les sites propres à entrer dans l'étude, à chaque étape le nombre des sites diminue parallèlement dans chacun des deux groupes associés. Simultanément, la courbe de charge est pour chaque sous-groupe obtenu, différente de celle du groupe dont le sous-groupe est extrait par ce ciblage.

La figure suivante illustre, pour chaque étape et pour l'ensemble des sites effacés ainsi passés au crible, la courbe de consommation associée[16].

Les traitements 3 et 6 aboutissent à une courbe de consommation du groupe des sites considérés n'ayant plus le même profil. Le traitement 3 consiste à retirer les sites ayant une consommation nulle juste avant l'effacement (supposé intervenir à partir du pas de temps 25 sur la figure), ce qui cible l'échantillon sur des sites ayant en moyenne une consommation plus forte sur la période

Figure 33 – Impact des traitements de données sur la courbe de consommation des sites considérés



16. Pour les traitements 3 et 6, on suppose que les ordres d'effacement auraient débuté au pas de temps 25. Le traitement 5 n'est pas reproduit puisqu'il implique la réalisation effective d'un effacement.

précédant l'effacement ; le traitement 6 visant à retirer les sites ne consommant que faiblement sur des plages complètes avant et après l'effacement, donc cible un échantillon de sites ayant en moyenne une consommation plus forte à ces moments, ce qui se traduit graphiquement par les deux bosses observables sur la figure et un creux au moment de l'effacement.

VOLTALIS a justifié ces traitements par le fait qu'ils sont représentatifs du mode opératoire réel qu'elle met en œuvre pour procéder à ses effacements ; pour VOLTALIS, ils ont pour objet de cibler le périmètre des groupes de sites étudiés de façon pertinente pour l'objet de l'étude.

VOLTALIS considère également, pour ce qui est plus particulièrement du choix d'écarter les sites n'ayant pas une consommation significative après l'effacement, que le traitement proposé reflète la pratique habituelle de RTE consistant à exiger, pour compter comme effacement une baisse de consommation d'un site, que cette consommation « remonte » après l'effacement. Le choix inverse permettrait de réintégrer dans l'échantillon des sites qui ne se remettent pas à consommer après l'effacement, et donc qui ont moins de report et plus d'économies d'énergie. Le choix proposé par VOLTALIS conduit donc, selon elle, à surévaluer le taux de report et minimiser le taux d'économies d'énergie.

RTE rappelle que la méthode TED repose sur la constitution de groupes de sites disposant de consommations proches. Introduire des traitements spécifiques conduisant à modifier la composition des groupes est de nature à biaiser les résultats (les groupes peuvent ne plus être comparables après les traitements). Selon VOLTALIS, RTE n'a pas mis en évidence de tel biais, ce qui est cohérent avec le fait que ces traitements sont appliqués aussi bien aux deux types de groupes (témoin et effacé). VOLTALIS rappelle en outre que le calage, intrinsèque à la méthode du Témoin Éprouvé Dynamique, a pour but de neutraliser tout tel biais éventuel. RTE et VOLTALIS ont donc constaté leur divergence d'appréciation sur ce point (même si, comme on le verra, il en résulte une faible différence dans l'appréciation du taux de report).

Par ailleurs, le traitement 5 (qui consiste à écarter de l'échantillon considéré comme effacé les sites ne répondant pas à l'ordre d'effacement) ne peut être appliqué que sur les groupes de sites effacés. Selon RTE, il n'est pas souhaitable d'introduire des traitements différenciés (induisant un ciblage sur l'échantillon effacé, et non sur l'échantillon témoin). Selon VOLTALIS, ce traitement est nécessaire pour étudier le taux de report de sites effectivement effacés, et le supprimer serait une source d'erreur. Néanmoins, RTE propose de supprimer ce traitement qui lui paraît non nécessaire à l'étude.

Compte tenu de ces éléments, RTE a proposé de ne pas appliquer les traitements 3, 5 et 6 (piste que VOLTALIS a suivie au 1.4).

Il en résulte les résultats ci-dessous. On note que le fait de supprimer les traitements 3, 5 et 6 modifie à la baisse le taux de report obtenu de manière significative.

Tableau 12 – Comparaison des résultats avec ou sans les traitements 3, 5 et 6

	Taux de report à 5h	Taux de report à 8h
Méthode TED	-2,6%	5,5%
Variante après suppression des traitements 3, 5 et 6	-9,3%	-3,5%

1.3.2 Intérêt du calage

La méthode TED repose sur une comparaison entre la consommation des groupes effacés et des groupes témoins pour chaque effacement et pour chaque paire de groupes constituée (un groupe est tour à tour effacé puis témoin de l'autre groupe constitutif de la même paire).

Dans la version initiale, VOLTALIS a proposé un calage de la consommation du groupe témoin sur celle du groupe effacé de façon à se prémunir d'une éventuelle dérive de comportement entre les deux groupes. RTE considère de manière générique que le calage est susceptible d'introduire un double biais dans l'évaluation du report, s'il intervient alors que celui-ci est encore en cours :

- le report de consommation est par définition alors tronqué à 8 heures ;
- la consommation du groupe témoin risque d'être surévaluée pendant les 8 heures consécutives à l'effacement puisqu'elle intègre un calage sur une période qui contient encore du report.

VOLTALIS a présenté une méthode afin d'évaluer l'impact de ce calage sur l'évaluation du report (par bootstrap). Les résultats obtenus par VOLTALIS figurent au §1.2.4 et permettent, selon cette dernière, de conclure, d'une part, que le report est bien terminé 18 heures après l'effacement (plus d'évolution entre 18 et 22 h) et, d'autre part, que celui-ci pourrait être de l'ordre de 15% à l'échéance 18 h. Les réserves de RTE ont été mentionnées au § 1.2.4.

Afin d'analyser et de quantifier le report au-delà de la période des 8 heures consécutives à l'effacement dans un cadre s'inspirant du protocole conçu par VOLTALIS, RTE a proposé une variante de la méthode TED reposant sur une suppression de l'étape de calage et sur une approche en « client moyen ».

Ainsi, la variante proposée par RTE consiste, en premier lieu, à traiter les courbes de consommation des sites en moyenne par pas de temps (pour chaque groupe et chaque pas de temps, les valeurs de consommation sont moyennées), et non comme une somme à l'instar de la proposition de VOLTALIS. RTE considère que cette modalité de calcul est bien représentative de la grandeur que l'on cherche à évaluer, c'est-à-dire le taux de report pour un site moyen qui participe aux effacements réalisés. Ce taux de report moyen correspond à une évaluation normative du report par catégorie d'effacement, comme cela a été présenté au chapitre 1 du rapport. La pertinence de cette approche par « client moyen » fait l'objet d'un désaccord entre RTE et VOLTALIS, notamment du fait de l'introduction de la variable « nombre de sites » que VOLTALIS considère exogène au problème, les groupes de sites ayant été constitués pour être comparables en énergie totale et non en énergie moyenne :

- RTE a vérifié que les consommations moyennes de deux groupes appariés sont proches (les indicateurs MAPE et MPE montrent la même proximité qu'entre les consommations sommées) et considère donc que le passage en client moyen est approprié pour l'évaluation recherchée.
- selon VOLTALIS, cette différence d'effectifs provoque une erreur lorsque l'on compare les consommations moyennes par site plutôt que les consommations des groupes constitués pour être comparables en consommation totale, et cette erreur (0,3% sur le nombre de sites) se répercute en un biais de 12 points sur le taux de report.

RTE a cherché à évaluer les différences liées à l'introduction de la notion de client moyen par rapport à la méthode TED initiale.

Comme indiqué ci-dessus, les résultats demeurent très proches sur les périodes de repos. Les courbes de consommation moyennes des deux groupes de chaque paire sont très proches, comme le montre le tableau du § 1.3.5 (indicateurs d'écart entre les consommations moyennes de deux groupes d'une même paire sur les jours de repos). L'importance du nombre de sites composant l'échantillon permet d'expliquer cette proximité, malgré la constitution des groupes par VOLTALIS en tenant compte d'un critère lié à la somme des consommations. Le passage à la notion de « client moyen » permet donc, pour RTE, une évaluation pertinente des puissances consommées.

D'autre part, cette proximité avec les résultats se retrouve lorsqu'on évalue le report 8 heures après l'effacement (la méthode initiale TED et les différentes variantes chiffrées par RTE donnent alors des résultats encore comparables), en réintroduisant le calage (le calage n'a pas seulement d'impact au-delà des 8 heures, il conduit également à modifier les résultats à cet horizon car il influe sur les références de consommation considérées avant l'effacement). Selon RTE, l'introduction per se de la notion de client moyen ne semble donc pas introduire un biais qui serait perceptible au bout de 8 heures.

L'horizon de comparaison des deux méthodes s'arrête à 8 heures : l'intérêt de la variante proposée par RTE est de permettre un calcul du report au-delà de cet horizon.

Comme indiqué au 1.2.4, les travaux conjoints de RTE et VOLTALIS ont mis en évidence un phénomène de report pouvant être plus long que la durée de 8 heures initialement envisagée par VOLTALIS. Les variantes de RTE (« client moyen ») et VOLTALIS (TED[acq](18 h), cf. section 1.4) permettent de s'affranchir de cette limite à 8 heures. Selon RTE, la solution TED[acq](18 h) proposée par VOLTALIS n'est pas nécessairement suffisante, car elle ne permet pas d'intégrer un potentiel report au-delà de 18 h. VOLTALIS considère pour sa part que les résultats à ce jour ne montrent pas un report significatif au-delà de cette durée, et que d'autre part la méthode du « client moyen » introduit un biais supérieur à ce que RTE cherche à vérifier. Les positions de VOLTALIS et de RTE divergent donc sur la méthode pertinente pour intégrer le report éventuel loin des modulations.

Tableau 13 – Comparaison des taux de report entre TED et une première variante proposée par RTE (suppression des traitements 3, 5 et 6, suppression du calage, passage en client moyen)

	Taux de report à 8 h	Taux de report à 10 h	Taux de report à 22 h
TED (traitements 1, 2, 3, 4, 5 et 6, calage à 8 h)	5,5 %	_	_
Traitements 1, 2 et 4 et calage	-3,5 %	_	_
Traitements 1, 2 et 4 et calage, Moyenne des consommations	-3,5 %	_	_
Traitements 1, 2, 4, sans calage, Moyenne des consommations	6,6 %	10,4 %	22,7 %

Les résultats à 10 heures et à 22 heures d'une variante proposée par RTE[17] sont présentés ci-dessous : ils sont significativement supérieurs à ceux de la méthode TED initiale.

Ainsi, la variante proposée par RTE, avec suppression du calage et passage en client moyen, permet d'observer le report jusqu'à 22 h après la fin de l'effacement. Les différents résultats présentés montrent également que le traitement des consommations en moyenne plutôt qu'en somme (avec traitements 1, 2 et 4 et calage) ne modifie pas le résultat de report à 8 h.

Le tableau suivant permet de visualiser l'évolution des indicateurs d'écart entre les deux groupes de chaque paire sur des périodes d'observation tirées au hasard pendant les deux jours de repos avec et sans calage.

À l'issue de cette analyse, RTE considère que la suppression de l'étape de calage présente dans la méthode TED et la transformation en client moyen permettent d'enrichir la compréhension du phénomène de report de consommation. *A minima*, elle permet d'illustrer certaines caractéristiques de la méthode TED, et ainsi d'en mieux en saisir le périmètre de validité, intrinsèquement lié à la nécessité d'un calage. *A maxima*, elle permet de corriger l'évaluation quantitative du phénomène de report durant la fenêtre de 8 heures, et de la compléter à l'horizon 22 heures. Il peut toutefois exister des dérives structurelles entre les groupes effacés et témoins non

Tableau 14 – Comparaison entre les écarts de consommation de deux groupes avant et après calage

		MAPE		MPE	
		Période totale d'observation	**Période d'effacement et d'évaluation du report**	**Période totale d'observation**	**Période d'effacement et d'évaluation du report**
Avant calage	Quantile 5 %	0,90 %	0,86 %	-0,17 %	-0,20 %
	Moyenne	0,96 %	0,93 %	0 %	0 %
	Quantile 95 %	1,03 %	1,02 %	0,18 %	0,21 %
Après calage	Quantile 5 %	0,80 %	0,98 %	-0,2 %	-0,37 %
	Moyenne	0,88 %	1,11 %	0 %	0 %
	Quantile 95 %	0,95 %	1,25 %	0,2 %	0,38 %

17. La méthode finale proposée par RTE ne conserve pas les traitements 1, 2 et 4 de TED et donc concerne un périmètre différent.

traitées par la variante proposée par RTE, risque que n'évite pas non plus le calage des groupes l'un par rapport à l'autre. Cette analyse apparaît donc à RTE comme un complément nécessaire aux analyses réalisées sur la base de la méthode TED.

Il en résulte une variante reposant sur la suppression du calage, le recours à un client moyen et la suppression des traitements 3, 5, 6 de TED.

1.3.3 Traitements des valeurs manquantes

L'existence de valeurs manquantes dans les séries statistiques est une question identifiée en matière de comptage ou de mesure pour les opérateurs qui sont amenés à acquérir et stocker un grand nombre de données. Plusieurs traitements sont classiquement appliqués dans ces cas, et peuvent être discutés dans le cas d'espèce. Les options possibles sont alors les suivantes :

- pour chaque site, dans le cas où la valeur de consommation est manquante, la remplacer par la moyenne des valeurs encadrantes (aux pas de temps précédent et suivant). Cela suppose qu'il n'existe pas de valeurs manquantes successives, que les valeurs encadrantes constituent effectivement une bonne information pour estimer la valeur inconnue ; il est également alors nécessaire de retirer au préalable les sites caractérisés par plusieurs valeurs manquantes successives. C'est la méthode proposée par VOLTALIS (traitements 1, 2 et 4 décrits ci-dessus). Cette méthode revient à dire qu'un défaut ponctuel de connaissance d'un site peut être gommé par les passé et futur immédiats de ce site ;
- ne prendre en compte aucune valeur pour les pas de temps concernés par les valeurs manquantes pour lequel l'information de consommation n'est pas disponible, ce qui signifie exclure le site concerné du périmètre à l'instant considéré. Cette méthode revient à considérer qu'un défaut ponctuel de connaissance d'un site peut être gommé en excluant ce site, ou, ce qui revient au même, en lui affectant à ce moment la moyenne des consommations des autres sites à cet instant. Cette modalité est compatible avec un traitement des consommations en valeur moyenne (pour chaque pas de temps, calcul de la moyenne des valeurs de consommation renseignées).

L'existence de valeurs manquantes peut provenir de multiples facteurs (défaut d'alimentation du site, dysfonctionnement de la mesure, dysfonctionnement de la transmission, pertes de données, etc.) et peut légitimement faire l'objet de traitements spécifiques si des données objectives y président.

Dans ce cas d'espèce, en l'absence d'information spécifique sur l'origine de ces données manquantes, le choix de RTE consiste à s'abstenir de remplacer ces valeurs manquantes. Ce choix permet de prendre en compte toutes les informations disponibles (pas d'exclusion de sites pour cause de valeurs manquantes à un instant donné) et ne nécessite pas de formuler d'hypothèse supplémentaire concernant le comportement des sites sur les pas de temps pendant lesquels la mesure n'est pas disponible.

Pour VOLTALIS, avec ce choix, une hypothèse forte est faite : celle qu'il n'y ait pas de lien entre le comportement de consommation d'un site et la qualité d'acquisition des points. Or l'absence d'information sur les causes du manque de données ne signifie pas qu'il n'y ait pas de telle cause, et partant, de biais dans un tel choix. VOLTALIS a donc cherché à vérifier cette hypothèse, qui lui est apparue erronée : dans les données utilisées pour la présente étude, une corrélation peut être constatée (sinon expliquée) : la puissance moyenne observée sur un site s'avère corrélée positivement avec le taux d'acquisition ; le choix de RTE conduit donc selon VOLTALIS à surévaluer la puissance des sites défaillants. Par exemple, sur le premier groupe témoin, on observe sur les sites à acquisition intermédiaire[18] une puissance moyenne de 794 W alors que la méthode de reconstruction des valeurs manquantes de RTE obtient une moyenne de 848 W (+6,8 %).

Cette analyse n'a été menée par VOLTALIS et portée à la connaissance de RTE qu'au cours de la procédure contradictoire, et donc à l'issue des travaux menés en commun au cours de l'année 2015. Sur la base de ces nouveaux éléments, VOLTALIS considère que les sites définis comme à acquisition intermédiaire peuvent être répartis de manière équitable entre deux groupes de sites formant une paire de groupes. De plus, même s'ils étaient inéquitablement répartis, la proposition du protocole expérimental d'alterner le groupe témoin et le groupe de sites effacés assure dans une certaine mesure, selon RTE, deux effets qui s'inversent d'un effacement à l'autre sur une paire de site donnée, évitant un biais dans l'analyse.

18. Site à acquisition intermédiaire : entre 25 % et 75 % des valeurs attendues sont présentes.

Tableau 15 – Comparaison de résultats avec différentes options de traitement des valeurs manquantes

		Taux de report 8 h après la fin de l'effacement fondé sur les effacements constatés
Sans prétraitement	ne pas remplacer les valeurs manquantes (NA)	8,0 %
	remplacer NA par 0	7,7 %
	remplacer NA par valeurs encadrantes	8,4 %
Traitement lié au taux d'acquisition (suppression des courbes avec un taux d'acquisition < 90 %)	ne pas remplacer les NA	8,4 %
	remplacer NA par 0	8,2 %
	remplacer NA par valeurs encadrantes	8,4 %
Traitement lié aux valeurs manquantes successives (suppression des courbes avec plusieurs valeurs manquantes successives)	ne pas remplacer les NA	6,7 %
	remplacer NA par 0	6,6 %
	remplacer NA par valeurs encadrantes	6,6 %

Le tableau ci-dessus indique l'impact des différents traitements liés aux valeurs manquantes (les traitements sont réalisés sans calage et en client moyen sur une période commençant 10 heures avant l'effacement et se terminant 22 heures après. L'impact respectif des traitements 1, 2 et 4 de la méthode TED ont été étudiés. Dans tous les cas, les traitements 3, 5 et 6 n'ont pas été appliqués).

1.3.4 Impact de la définition du taux de report

Les évaluations proposées par VOLTALIS reposent sur une délimitation du volume de l'effacement selon les « ordres d'effacement » : l'effacement d'un site correspond à la baisse de charge qui intervient durant la période d'effacement telle que définie par l'ordre d'effacement adressé à ce site. Les éventuelles baisses ou hausses de consommation ultérieures sont considérées comme des effets de bord, et leur somme algébrique constitue le report.

Le taux de report consiste alors à rapporter l'énergie reportée (nette) à la valeur de l'effacement intervenant pendant les périodes pour lesquelles des ordres d'effacement sont adressés aux sites.

Les volumes effacés et reportés sont ainsi calculés comme suit (t1, t2 et t3 sont les pas de temps pour lesquels des ordres d'effacement sont activés) :

$$\text{Veff (i)} = \sum_{t1,\,t2,\,t3} (\text{consommation témoin (t)} - \text{consommation effacée (t)})$$

$$\text{Vrep (i)} = \sum_{\text{pas de temps} \setminus \{t1,\,t2,\,t3\}} (\text{consommation effacée (t)} - \text{consommation témoin (t)})$$

Les évaluations réalisées par RTE dans le cadre du rapport reposent d'une part sur ce taux (basé sur les ordres d'effacement), mais également sur un taux fondé sur les baisses de consommation constatées (y compris au-delà des ordres d'effacement envoyés par l'opérateur d'effacement).

Ce taux a été utilisé lors des discussions menées en concertation au cours de l'année 2015. Dans ce cadre, l'effacement du site correspond à l'ensemble de l'énergie effacée, considérée pendant et au-delà de l'ordre d'effacement proprement dit, et l'énergie reportée est prise en compte uniquement après que le rattrapage de consommation a eu lieu.

Il convient de souligner que ces deux conventions de calcul du taux de report portent sur un phénomène physique identique (mêmes courbes de charge) mais la caractérisent par un chiffre différent du fait de conventions différentes entre ce qui est qualifié d'« effacement » et ce qui est qualifié de « report ».

Cette seconde convention permet de prendre en compte le fait que la reprise de consommation peut être différée après la fin de l'effacement, l'effacement se prolongeant alors au-delà de la période d'effacement définie par l'ordre envoyé par l'opérateur d'effacement. Dans le cadre de cette analyse, la définition proposée par RTE prévoit de borner la prise en compte de cet effet à 3 heures[19] après la fin des ordres envoyés.

Les volumes effacés et reportés sont alors calculés comme suit :

$$\text{Veff (i)} = \sum_{\substack{\text{pas de temps t<3 heures} \\ \text{après fin effacement}}} \max(\text{consommation témoin (t)} - \text{consommation effacée (t)};0)$$

$$\text{Vrep (i)} = \sum_{\substack{\text{pas de temps t<3 heures} \\ \text{après fin effacement}}} \max(\text{consommation effacée (t)} - \text{consommation témoin (t)};0) + \sum_{\substack{\text{pas de temps t>3 heures} \\ \text{après fin effacement}}} (\text{consommation effacée (t)} - \text{consommation témoin (t)})$$

- Les énergies effacées d'une part et reportées d'autre part sont sommées pour les 24 effacements réalisés.
- Les taux de report moyens sont calculés par quotient entre la somme des énergies reportées et des énergies effacées pour les 24 effacements.

$$\textit{Taux report} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \text{Vrep(i)}}{\sum_{i=1}^{24} \text{Veff(i)}}$$

L'analyse du phénomène de report justifie, pour RTE, le recours à ces deux définitions du taux de report. C'est la raison pour laquelle RTE a souhaité évaluer les résultats de la méthode TED et de sa variante présentée ci-dessus en utilisant ces deux conventions.

Celles-ci aboutissent, dans le cadre de la présente expérimentation, à des quantifications très différentes : l'écart est généralement de l'ordre de 20 points (voir Tableau 9 ci-après). Ainsi, les différences associées à la définition même du « taux de report » l'emportent largement sur les autres considérations rapportées dans la présente analyse, y compris celles entourant la pertinence du calage.

S'agissant du choix de convention à privilégier pour rendre compte du taux de report et décliner la nouvelle législation, VOLTALIS a souhaité rappeler que le taux de report ne doit pas seulement témoigner de ce que l'effacement permet de réaliser des économies d'énergie significatives comme le mentionne l'article L. 271-1 ; il doit en outre être cohérent avec le volume d'effacement auquel il s'appliquera pour la mise en œuvre de l'article L. 271-3. Au vu des règles et de la pratique de RTE pour la délimitation des volumes d'effacement, VOLTALIS considère que le plus rigoureux demeure de limiter les effacements selon les ordres d'effacement, et donc de travailler avec le taux fondé sur les ordres. RTE considère pour sa part la convention de mesure fondée sur les baisses de consommation constatées plus pertinente du point de vue du système électrique, ce qui justifierait qu'elle soit préférée pour l'évaluation des économies d'énergie et la valorisation des effacements sur les marchés. Elle permet en effet de saisir l'intégralité du phénomène physique de sous-consommation correspondant à l'effacement et de différence par rapport à une référence au delà, indépendamment de toute considération sur les ordres d'effacement.

19. La limite des 3 heures a été proposée par RTE sur la base des premiers travaux réalisés : à cette échéance, sur les cas observés par RTE, le phénomène de consommation semble en effet avoir généralement cessé. Cette limite (qui pourrait être fixée à d'autres niveaux en fonction des observations et des cas de figure rencontrés) permet alors de ne pas comptabiliser comme du report ou de l'effacement les oscillations inévitables entre la courbe de référence et la courbe des sites effacés lorsque les niveaux de consommation sont redevenus proches. À la lumière des expériences menées, Voltalis a contesté l'utilisation d'une telle limite, car (i) la durée de latence avant le redémarrage est très variable selon les sites lors d'un effacement donné et aussi selon les effacements d'un même site (cf. analyse figurant au 1.6 page 87) et (ii) même après redémarrage d'un site, sa consommation continue d'évoluer de façon très diverse, au point que nombre de sites consomment toujours moins qu'avant l'effacement.

1.3.5 Bilan des résultats obtenus avec la variante proposée par RTE et incertitudes associées

L'ensemble des discussions présentées ci-dessus a conduit RTE à proposer une variante de la méthode TED élaborée par VOLTALIS. Cette variante consiste en la suppression des traitements préalables de données, en la suppression du calage à 8h (par l'intermédiaire d'un calcul en « client moyen »), et en l'absence de traitement des valeurs manquantes. Selon RTE, cette variante présente notamment l'avantage de permettre une évaluation du report sur une durée d'observation plus longue : alors que la méthode initiale ne permettait qu'un calcul du report intégré sur une période de 8 heures, la suppression des étapes de calage permet de calculer le report jusqu'à l'effacement suivant réalisé sur le groupe témoin, soit 22 heures après la fin de l'effacement).

Les résultats de cette variante peuvent être présentés en utilisant les deux conventions mentionnées au § 1.3.4 :

Tableau 16 – Résultat de report avec la variante proposée par RTE

	Taux de report 5h après la fin de l'effacement	Taux de report 8h après la fin de l'effacement	Taux de report 10h après la fin de l'effacement	Taux de report 18h après la fin de l'effacement	Taux de report 22h après la fin de l'effacement
Taux de report fondé sur les ordres d'effacement	-4%	8%	13%	28%	30%
Taux de report fondé sur les baisses de consommation constatées	21%	30%	34%	45%	46%

Les résultats sont très différenciés entre les deux taux calculés : l'effacement se prolonge donc en moyenne au-delà des ordres envoyés, la reprise de consommation n'étant pas immédiate après la fin des ordres d'effacement. Cet effet est illustré sur les courbes moyennes des groupes effacé et miroir représentées ci-dessous, qui montrent après la fin de l'effacement un rebond initial, (dont l'amplitude peut être maitrisée selon VOLTALIS dans ses processus opérationnels), puis une sous-consommation, puis une surconsommation.

Figure 34 – Courbe moyenne des groupes effacés et des témoins associés

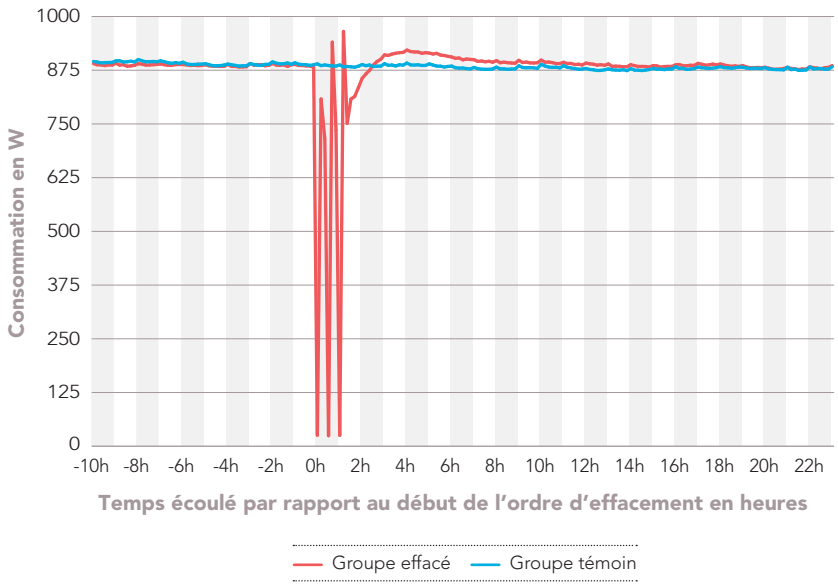


Tableau 17 – Indicateurs d'écart entre les consommations de deux groupes d'une même paire (variante de la méthode TED)

Indicateurs d'écarts entre les deux groupes d'une même paire par période d'observation	MAPE Erreur moyenne en valeur absolue	MPE Erreur moyenne
Quantile 5%	0,91%	-0,26%
Moyenne	0,99%	0%
Quantile 95%	1,08%	0,23%

• Précision de la courbe de référence

Le tableau ci-dessus donne les indicateurs d'écart MAPE et MPE entre les deux groupes de chaque paire pour des périodes d'une durée égale à la période d'observation (17 h 10) choisies au hasard pendant les deux jours de repos préalables aux effacements.

Les deux indicateurs de MAPE et MPE montrent une grande similitude entre la consommation de deux groupes sur les deux jours de repos avec des indicateurs permettant de conforter l'hypothèse que le groupe témoin est susceptible de fournir une évaluation de bonne qualité de la courbe de référence. Les indicateurs moyens sont proches de zéro et faiblement dispersés sur l'ensemble des tirages. Ces bonnes performances sont notamment liées au nombre très significatif de sites engagés dans l'expérimentation, ce qui permet d'assurer une bonne représentativité statistique.

• Pseudo-report

RTE a procédé à une évaluation de la variante en calculant un « pseudo-report » associé à des effacements fictifs. Le pseudo-report est évalué sur les deux jours pendant lesquels aucun ordre d'effacement n'a été adressé aux sites. Pour se rapprocher des conditions du protocole, sur ces jours, des groupes de 24 pseudo-effacements sur les différentes paires de groupes sont tirés au hasard (100 tirages de 24 pseudo-effacements ont été effectués) et chaque fois le report est calculé sur la base de ces 24 effacements. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Les pseudo-reports sont proches de zéro et faiblement dispersés. RTE en déduit que les principes de la méthode TED, conservés dans la variante sont robustes sur la base de cet indicateur. Le biais observé sur le pseudo-report fondé sur les baisses de consommation constatées ne semble pas significatif : en l'absence d'effacement, l'indicateur intègre le bruit naturel entre deux courbes de charge construites pour être proches. Durant les premières heures suivant un effacement réel, RTE attend que ce bruit soit faible devant le report.

Tableau 18 – Pseudo report à 8 h associé à la variante proposée par RTE

	Pseudo report associé au taux fondé sur les ordres d'ajustement	Pseudo report associé au taux fondé sur les baisses de consommation constatées
Quantile 5%	-4,92%	-0,22%
Moyenne	0,11%	3,86%
Quantile 95%	4,42%	7,73%

• Variabilité par effacement

La dispersion des résultats obtenus sur les 24 effacements réalisés sur 4 paires de groupes de sites, sur la base du taux fondé sur les baisses de consommation constatées, est représentée par la figure suivante.

Le résultat effacement par effacement est fortement dispersé (taux de report à 8 h compris entre 9 et 58 %, sur les baisses de consommation constatées). Cette dispersion pourrait provenir des instabilités de la méthode d'évaluation, provenir de la dépendance du taux de report au créneau horaire pendant lequel l'effacement est mis en œuvre, ou être attribuables à d'autres paramètres non identifiés dans la présente étude. Même si les résultats sont fortement dispersés, il est difficile d'en tirer une conclusion relative à la viabilité de l'évaluation sur une moyenne de 24 effacements.

• Analyse de la sensibilité par Bootstrap

Les méthodes fonctionnant sur la base de témoins ou de panels sont naturellement sensibles aux questions d'échantillonnage et de constitution des sites témoins. Il est dès lors intéressant d'essayer d'évaluer la sensibilité de la méthode aux choix initiaux de constitution du témoin, en procédant à des ré-échantillonnages. C'est l'objet de l'analyse par bootstrap, qui permet d'évaluer la sensibilité des résultats au choix initial des sites pour réaliser l'étude. Le principe général est de reconstituer des échantillons par tirage au sort de sites avec remise. Ainsi de nouveaux groupes sont créés avec un nombre identique de sites par rapport à l'échantillon initial, puis la méthode précédemment décrite est appliquée à l'identique.

Par suite, certains sites n'apparaissent plus dans l'échantillon recomposé tandis que d'autres apparaissent plusieurs fois du fait du tirage avec remise. L'intervalle de confiance présenté dans la figure suivant est déterminé à partir de cette méthode par bootstrap. Pour cela, 1000 ré-échantillonnages (nombre usuel pour la réalisation d'un intervalle de confiance) sont réalisés. Le cumul des écarts entre la courbe de consommation et la courbe de référence rapporté au volume d'effacement est ensuite calculé à chaque tirage et l'intervalle de confiance à 90 % est déduit en calculant les quantiles à 5 % et à 95 % des 1000 résultats obtenus. Ce bootstrap donne une indication sur l'incertitude associé aux résultats obtenus avec la variante proposée par RTE (incertitude liée à la constitution des groupes), il ne permet pas de calculer un taux de report moyen issus des différents ré-échantillonnages.

Ainsi, la sensibilité à l'échantillonnage reste faible jusqu'à environ 10 heures après l'effacement, 20 heures après, elle devient plus importante et réduit le caractère

Figure 35 – Dispersion des taux de report fondé sur les baisses de consommation constatées unitaires à 8 h pour les 24 effacements associés à la variante proposée par RTE

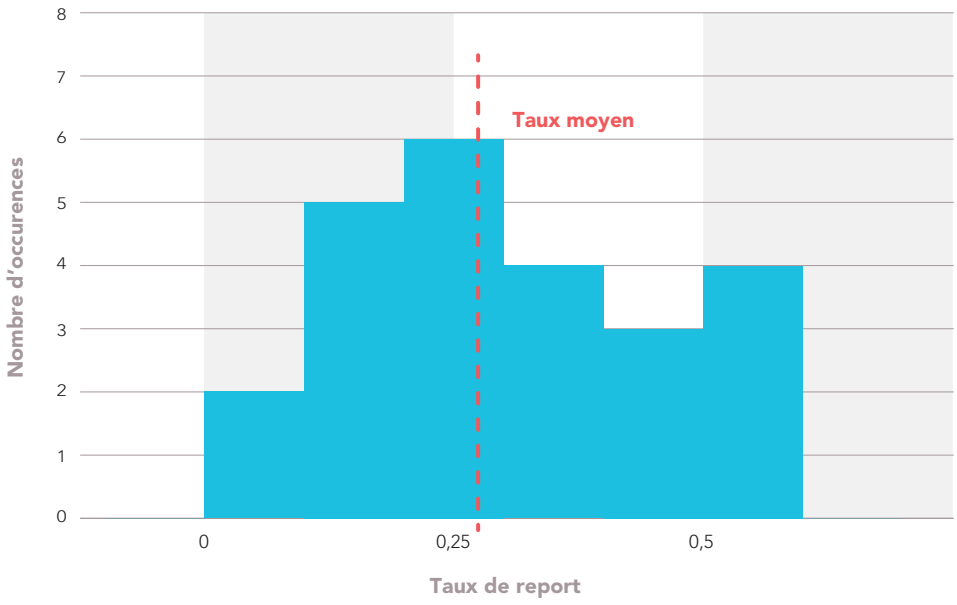
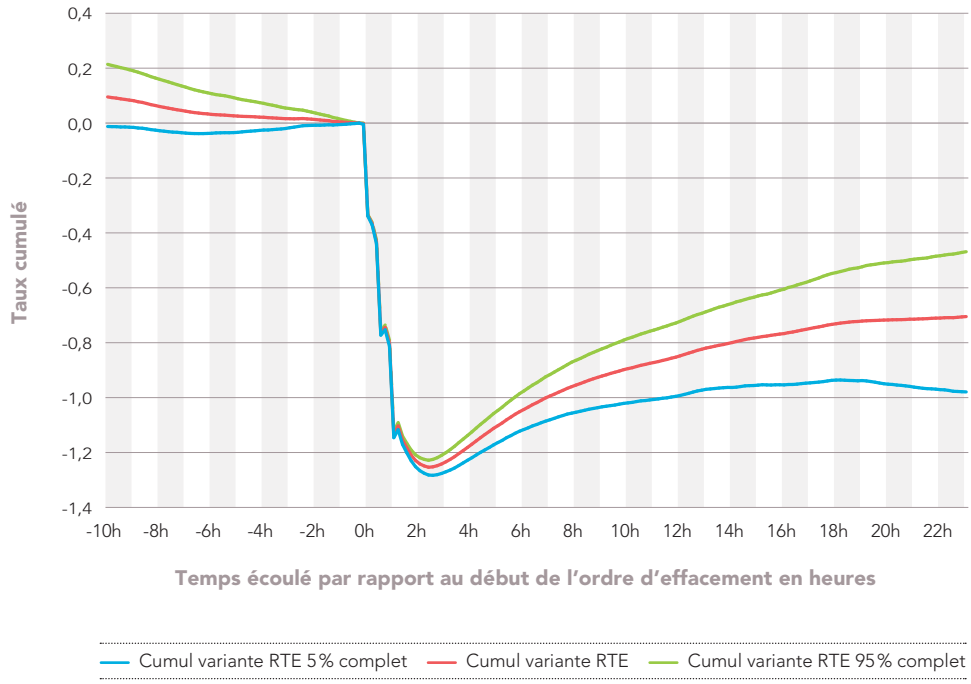


Figure 36 – Dispersion des écarts cumulés de consommation sur les tirages par ré-échantillonnage dans la variante proposée par RTE



significatif de l'évaluation du report. RTE note l'écart entre les différentes courbes avant l'effacement et leur décentrage, et interprète ces résultats comme un signe possible que le report lié à l'effacement précédent n'est pas terminé, ce qui attesterait de l'existence d'un report long.

VOLTALIS interprète pour sa part ces résultats comme l'illustration de la variété des comportements naturels des sites, qui justifie les étapes de calage des groupes dans la méthode TED.

• Analyse de la sensibilité des résultats au mode de traitement des valeurs manquantes

Les méthodes de traitement des valeurs manquantes faisant l'objet de débats, RTE a souhaité évaluer la sensibilité des résultats au mode de traitement des valeurs manquantes.

Les deux tableaux suivants représentent les variations des deux différents modes de calcul du taux de report (fondé sur les ordres d'effacement, fondé sur les baisses de consommation constatées) en fonction de différents modes de traitement des valeurs manquantes sur le client moyen :

- Sans prétraitement : toutes les courbes de charge sont prises en compte quel que soit le taux de valeurs manquantes ;
- Traitement lié au taux d'acquisition : suppression des sites ayant plus de 10% de valeurs manquantes ;
- Traitement lié aux valeurs manquantes successives : suppression des sites ayant plus de 10% de valeurs manquantes et des sites ayant plusieurs valeurs manquantes successives.

Dans chacun des trois cas, trois modes de prise en compte des valeurs manquantes sont testées : pas de remplacement, remplacement par 0, remplacement par les valeurs encadrantes.

La sensibilité des taux au mode de traitement des valeurs manquantes reste modérée.

Tableau 19 – Sensibilité des taux de report en fonction des modes de traitements des valeurs manquantes

Taux de report fondé sur les ordres d'effacement		Taux de report 5 h après la fin de l'effacement	Taux de report 8 h après la fin de l'effacement	Taux de report 10 h après la fin de l'effacement	Taux de report 22 h après la fin de l'effacement
sans prétraitement	ne pas remplacer les NA	-4,0 %	8,0 %	13,0 %	30,0 %
	remplacer NA par 0	-3,7 %	7,7 %	12,4 %	27,5 %
	remplacer NA par valeurs voisines	-3,5 %	8,4 %	13,3 %	29,7 %
Traitement lié au taux d'acquisition	ne pas remplacer les NA	-2,9 %	8,4 %	12,9 %	28,2 %
	remplacer NA par 0	-3,1 %	8,2 %	12,6 %	27,7 %
	remplacer NA par valeurs voisines	-3,0 %	8,4 %	12,9 %	28,2 %
traitement lié aux valeurs manquantes successives	ne pas remplacer les NA	-3,6 %	6,7 %	10,7 %	22,8 %
	remplacer NA par 0	-3,8 %	6,6 %	10,5 %	22,6 %
	remplacer NA par valeurs voisines	-3,7 %	6,6 %	10,4 %	22,7 %

Taux de report fondé sur les baisses de consommation constatées		Taux de report 5 h après la fin de l'effacement	Taux de report 8 h après la fin de l'effacement	Taux de report 10 h après la fin de l'effacement	Taux de report 22 h après la fin de l'effacement
sans prétraitement	ne pas remplacer les NA	21,2 %	30,2 %	33,9 %	46,4 %
	remplacer NA par 0	20,9 %	29,6 %	33,2 %	44,7 %
	remplacer NA par valeurs voisines	21,2 %	30,3 %	34,0 %	46,5 %
traitement lié au taux d'acquisition	ne pas remplacer les NA	21,1 %	29,8 %	33,2 %	45,0 %
	remplacer NA par 0	21,1 %	29,7 %	33,1 %	44,6 %
	remplacer NA par valeurs voisines	21,2 %	29,9 %	33,3 %	45,0 %
traitement lié aux valeurs manquantes successives	ne pas remplacer les NA	20,5 %	28,5 %	31,5 %	40,8 %
	remplacer NA par 0	20,5 %	28,4 %	31,4 %	40,7 %
	remplacer NA par valeurs voisines	20,5 %	28,5 %	31,5 %	40,7 %

1.4 Prise en compte par VOLTALIS des limites notées par RTE et variante proposée par VOLTALIS dite TED[acq] (18 h)

Les taux de cette section sont exprimés selon la convention de comptage sur les ordres d'effacement.

VOLTALIS propose ici d'examiner la portée de deux objections de RTE concernant la méthode TED initialement proposée :

- la première concerne la durée d'observation du report, jugée trop courte par RTE ;
- la deuxième concerne les traitements appliqués aux données brutes de l'expérience, principalement les traitements 3, 5 et 6 (les traitements concernant la méthode de production en interne de VOLTALIS).

Pour prendre en compte ces deux objections et en évaluer la portée, VOLTALIS a proposé la méthode TED[acq] (18 h), une variante de TED. Il s'agit dans cette variante de conserver le point central de TED (limiter l'impact des dérives en réétalonnant à chaque bloc) tout en levant les objections de RTE :

- allongement de la durée d'observation du report à 18 heures ;
- ne conserver que les traitements d'acquisition, c'est-à-dire ceux qui pallient le manque de données (traitements 1, 2 et 4) et supprimer ici les autres (criblages 3, 5 et 6).

L'allongement de la durée d'observation du report de 8 heures à 18 heures est conforme à l'étude que VOLTALIS a présentée à la section 1.2.4 et au paragraphe « Analyse de la sensibilité par Bootstrap » de RTE (p. 37).

En ne conservant que les traitements d'acquisition, VOLTALIS se place dans un contexte similaire à celui étudié par RTE (voir Tableau 9) où seuls les traitements de valeurs manquantes sont appliqués.

Cette méthode, tenant compte des remarques de RTE, aboutit aux évaluations suivantes des taux de report et d'économies d'énergie à 18 heures :

$$Taux\ report = 19{,}5\,\%$$

$$Taux\ économies\ d'énergie = 80{,}5\,\%$$

Ces résultats ne sont pas totalement probants pour RTE, qui considère que le calage est en lui-même susceptible de fausser les calculs, même à partir de 18 h après l'effacement, si le report n'est pas alors terminé, ce que RTE considère vraisemblable. Cette objection a amené :

- tout d'abord, VOLTALIS à proposer une évaluation de l'erreur susceptible d'être ainsi commise, qui s'avère selon elle minime, ce qui n'a cependant pas été développé dans le présent rapport ;
- d'autre part, RTE à rechercher une évaluation dans lequel le calage est remplacé par une approche « en client moyen », variante développée et commentée ci-dessus par RTE ;
- enfin, VOLTALIS à proposer une évaluation de l'écart entre les résultats obtenus par l'approche en « client moyen » et d'une approche en somme sans calages ni traitement. Pour VOLTALIS, le nombre de site de chaque groupe est sans rapport avec l'objet de l'étude, qui sont les MWh consommés par chacun des groupes (constitués pour être comparables sur ce plan et non pour leur nombre de sites, qui sont de fait différents), et le traitement en « client moyen » introduit de ce fait un biais. Pour RTE, les nombres de sites des groupes sont en pratique très proches, et si le protocole expérimental est respecté, alors l'alternance des groupes témoins et effacés donne des situations symétriques d'un effacement à l'autre. L'écart entre les deux approches est de 12 points pour le taux de report fondé sur les ordres d'effacement. Cette analyse pourrait être étudiée dans la suite des travaux, car RTE et VOLTALIS conviennent des enjeux associés à ce type de quantification.

Tableau 20 – Résultat de report avec la variante proposée par VOLTALIS

	5 h	8 h	10 h	18 h
TED[acq] (18 h)	-3,3 %	8,3 %	12,8 %	19,5 %

1.5 Analyse de limites de la méthode proposée

Les éléments présentés ci-dessous par RTE permettent de mettre l'accent sur certaines caractéristiques de la méthode TED proposée par VOLTALIS et sur sa variante élaborée par RTE.

• Hétérogénéité du comportement des sites dans l'échantillon traité

Au sein des échantillons, il est possible d'isoler deux catégories de sites ayant des profils de reprise de consommation après l'effacement très différents. Pour la première catégorie, une reprise de consommation est observée dès que les ordres d'effacement cessent (reprise de consommation entre les deux ordres de 10 minutes, puis après la fin du troisième). Pour la deuxième catégorie, l'effacement se poursuit bien au-delà des ordres envoyés (pas de reprise entre deux ordres de 10 minutes, temps de latence de plusieurs heures après la fin du dernier ordre d'effacement avant que le site ne reprenne une consommation identique à celle qu'il avait avant l'effacement).

RTE a réalisé une segmentation des courbes de charges des sites observées lors de l'expérience TED en fonction du rapport entre les consommations avant et après le premier effacement unitaire (valeur inférieure ou supérieure à 1). La répartition obtenue est la suivante :

- 38 % reprennent *a minima* leur consommation initiale dès la fin de l'ordre ;
- 57 % consomment moins qu'avant l'effacement ;
- 5 % des sites ne peuvent être classés selon ce critère (du fait de valeurs manquantes notamment).

Les courbes de consommation de deux catégories de sites sont représentées dans les figures ci-dessous qui illustrent le comportement très différencié des catégories de sites.
Les taux de report associés à ces deux catégories figurent dans le tableau 21.

Comme souligné dans la section 1 de ce document, cette hétérogénéité du comportement perturbe l'évaluation du report. Une partie de la surconsommation des sites de la première catégorie est en effet compensée par la sous-consommation des sites de la deuxième catégorie. Cet élément apparaît important, du point de vue de RTE, pour expliquer les résultats avancés dans la présente restitution.

Figure 37 – Catégorie de courbes de charge avec reprise immédiate de la consommation après les ordres d'effacement

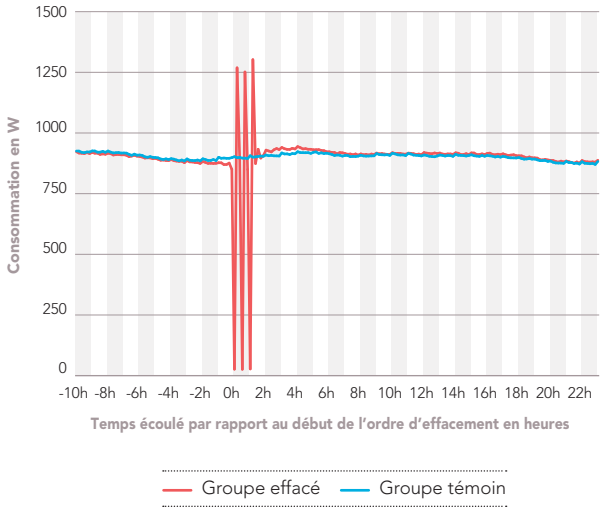
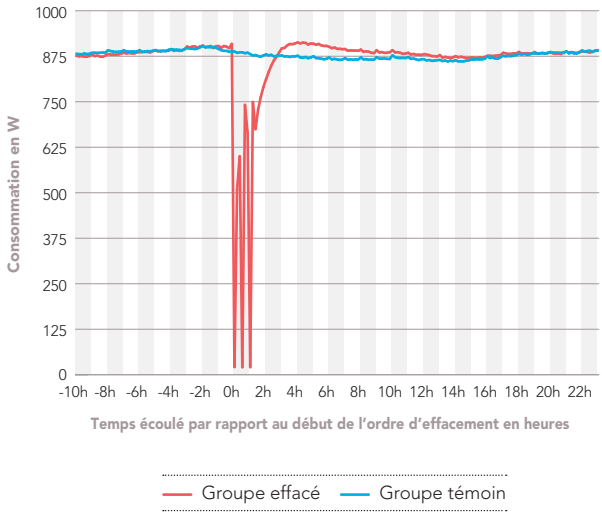


Figure 38 – Catégorie de courbes de charge avec reprise très différée de la consommation après les ordres d'effacement



VOLTALIS et RTE ont cherché à déterminer si des facteurs explicatifs structurels, basés sur la nature des sites de consommation ou le type de chauffage électrique utilisé, pouvaient être identifiés pour expliquer cette hétérogénéité. Une piste de réflexion présentée par ailleurs dans ce rapport a en effet eu pour objet de rechercher une modélisation du report en fonction de telles caractéristiques intrinsèques (type de logement considéré, année de construction, matériel électrique utilisé).

Tableau 21 – Comparaison de taux de report suivant les configurations de courbes de charge avec reprise différée ou immédiate

		5 h après l'effacement	8 h après l'effacement	10 h après l'effacement	22 h après l'effacement
Avec reprise différée	Taux fondé sur les ordres d'effacement	-46 %	-29 %	-17 %	-8 %
	Taux fondé sur les baisses de consommation constatées	15 %	25 %	32 %	38 %
Avec reprise immédiate	Taux fondé sur les ordres d'effacement	57 %	63 %	67 %	84 %
	Taux fondé sur les baisses de consommation constatées	60 %	65 %	69 %	85 %

Dans le cadre de la présente expérimentation, l'appartenance d'un site à l'une ou l'autre des catégories semble changer au gré des effacements. Il n'apparaît donc pas possible de retenir qu'un type spécifique d'effacement (avec reprise immédiate ou différée) correspond à une configuration particulière en matière de type de logement ou de chauffage.

• Durée du report

La méthode TED a été conçue avec l'hypothèse sous-jacente que le report était terminé au bout de 8 heures. Or les analyses quantitatives réalisées montrent qu'une part significative du report a lieu au-delà de 8 heures après l'effacement. RTE a proposé une variante permettant d'évaluer le report jusqu'à 22h après l'effacement. Si VOLTALIS considère que ses analyses montrent un report terminé après 18 heures, RTE ne considère pas que les éléments présentés permettent de valider cette hypothèse.

Par construction, la méthode TED ne permet pas d'observation au-delà de 24 heures (à cette échéance le groupe témoin devient lui-même un groupe effacé). De nouveaux tests seraient donc nécessaires pour disposer d'éléments expérimentaux sur une durée plus longue (sous réserves de disposer d'une mesure suffisamment précise).

1.6 Conclusions

Le protocole, la méthode TED et les variantes proposées par RTE, du fait du nombre important de sites impliqués et du schéma spécifique mis en place pour réaliser les effacements permettent une évaluation robuste du report lié aux effacements, notamment sur les dix premières heures.

La méthode TED proposée par VOLTALIS conduit à une évaluation du report à 8 heures de 5,5 % (avec un calage à 8 heures), et à une évaluation du report à 18 heures de 19,5 % (avec un calage à 18 heures). Ces chiffres sont ceux du taux fondé sur les ordres d'effacement.

Les résultats obtenus avec la variante proposée par RTE conduisent à un chiffrage sensiblement différent, en particulier selon la convention de taux utilisée :

- un taux de report à 10 heures de 13 % pour le taux fondé sur les ordres d'effacement avec un bon niveau de certitude ; un taux de report à 22 heures de 30 % avec une incertitude plus élevée ;
- un taux de report à 10 heures de 34 % pour le taux fondé sur les baisses de consommation constatées avec un bon niveau de certitude ; un taux de report à 22 heures de 46 % avec une incertitude plus élevée ;
- une durée du report longue sans qu'il soit possible de certifier une fin du report 22 heures après la fin de l'effacement.

Les différences essentielles entre les résultats de RTE et ceux de VOLTALIS proviennent de la suppression du calage proposé dans la méthode TED – et de l'introduction d'une approche en « client moyen » qui permet une évaluation du report sur 22 heures – et des impacts associés (ciblage par pertinence dans la méthode TED versus traitement en client moyen dans la variante RTE), mais surtout de la définition retenue pour le taux lui-même, qui constitue le paramètre le plus important.

La différence très significative entre les deux taux, selon la convention retenue pour délimiter le volume d'effacement, tient au comportement de certains sites participant à l'expérimentation qui n'ont repris leur

consommation que longtemps après l'arrêt de l'ordre d'effacement (l'effacement se prolonge au-delà des ordres envoyés par l'opérateur).

Pour autant, il ne semble pas que ce comportement soit stable pour un site donné et en constitue donc une caractéristique intrinsèque, mais bien qu'il soit variable pour un site donné selon les effacements. VOLTALIS l'a constaté en étendant l'étude de cet aspect initialement menée par RTE à 900 effacements répartis sur 2013-2014[20] et concernant les sites impliqués dans l'étude TED. Seulement 20 % des sites sont stables[21] et près de 45 % des sites sont à réponse variable[22] (RTE n'a pas eu accès à ces données et n'a donc pu vérifier ce résultat).

RTE et VOLTALIS ont échangé sur des interprétations susceptibles d'expliquer ces observations, qui pourraient notamment être liées au fonctionnement des systèmes de régulation des appareils de chauffage. Ces hypothèses restent à confirmer par des travaux ultérieurs et des expérimentations spécifiques.

Certaines limites de l'expérimentation ont également pu être identifiées.

D'une part, le comportement hétérogène des sites perturbe l'estimation d'un taux moyen par site (les profils de reprise de consommation après l'effacement sont très différents d'un site à l'autre).

D'autre part, le protocole retenu ne permet pas une évaluation de report au-delà de 24 heures, d'où une incertitude sur la durée maximale du report.

Enfin, la méthode repose sur la constitution de paires de groupes de sites, les groupes de sites au sein d'une même paire ayant une consommation comparable sur la période initiale de repos (22 janvier 2014) préalable à la semaine pendant laquelle sont réalisés les effacements (du 29 janvier au 4 février 2014), ce point étant vérifié au moment de la constitution des différents groupes. Les résultats obtenus par la méthode TED et par la variante proposée par RTE pourraient être influencés par une éventuelle dérive de comportement entre les deux groupes d'une même paire au fil du temps. Le nombre très élevé de sites participant à l'expérimentation est de nature à réduire ce risque. De plus, selon la proposition de VOLTALIS, la méthode TED prévoit un calage destiné à éprouver l'échantillon témoin de façon dynamique afin de s'assurer qu'il constitue toujours une référence appropriée pour l'évaluation du report intervenant sur l'échantillon effacé. Selon RTE, un tel calage présente d'autres inconvénients, et peut être remplacé par une approche différente (dit « par le client moyen »). RTE et VOLTALIS ont constaté leur divergence sur ce sujet et mis en évidence l'ampleur relative des conséquences sur le chiffrage du taux de report.

Version établie par RTE et acceptée par Voltalis le 1er mars 2016.

20. Les sites participent en moyenne à 164 effacements. Moins de 1 % des 45 000 sites a participé à moins de 30 effacements.

21. Stable : 80 % du temps la même réponse (sur ou sous-consommation) après un effacement.

22. Un site est à réponse variable si ses réponses aux effacements sont moins de deux tiers du temps dans la même catégorie. Un site à réponse variable a par exemple 40 % de surconsommation et 60 % de sous-consommation ou encore 55 % de surconsommation et 45 % de sous-consommation. Autrement dit, un site à réponse variable a un comportement suite à effacement proche du hasard.

ANNEXE 2
ÉVALUATION DU REPORT PAR LA MÉTHODE GAM APPLIQUÉE AUX EFFACEMENTS RÉALISÉS DANS LE CADRE DU MÉCANISME D'AJUSTEMENTS

La méthode proposée par RTE repose sur l'utilisation d'une méthode statistique de prévision de type GAM (Modèle additif généralisé). Cette méthode permet l'établissement de la courbe de référence qui est utilisée pour évaluer le report par comparaison avec la consommation réalisée des sites.

La méthode a été initialement développée par RTE dans le cadre du retour d'expérience sur l'expérimentation ajustements diffus, telle que définie par les règles du 5 décembre 2007 (aujourd'hui non applicables). Ce travail a donné lieu à un rapport publié dans le cadre de la Commission accès au marché du CURTE en décembre 2012. Les analyses menées par RTE avaient alors permis de conclure à l'existence d'un report d'une durée minimale évaluée à 6 à 8 heures. En revanche, compte tenu de l'incertitude sur les résultats obtenus, RTE n'avait pas proposé d'analyse quantifiée du report.

Les travaux ont pu être repris dans le cadre de la convention signée entre VOLTALIS et RTE le 16 février 2015. À cet effet, la description formelle de la méthode a fait l'objet d'une annexe à la convention. Ce travail a permis d'approfondir les analyses menées en 2012 en intégrant de nouvelles données par rapport à celles disponibles dans le cadre des règles expérimentales relatives à l'ajustement diffus, de redéfinir un nouveau paramétrage de la méthode et donc d'obtenir de nouveaux résultats, qui sont présentés ci-dessous.

1.1 Principe général de la méthode GAM

Le modèle GAM (modèle additif généralisé) est un modèle statistique qui permet de réaliser une prévision à partir d'une liste de variables explicatives et d'une somme de fonctions polynomiales par morceaux (splines) appliquées à ces variables. Ainsi les tests décrits ci-dessous, la consommation de référence de la capacité a été établie de la manière suivante :

$$Consommation\ référence\ (t) = \sum_i fi(Xi)$$

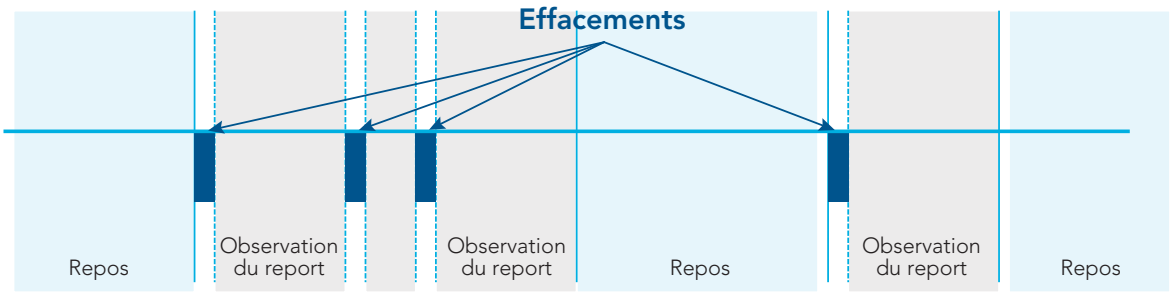
Les splines sont estimées de façon à minimiser l'écart entre la consommation réalisée et la prévision sur un historique de données.

1.2 Protocole de tests

La méthode GAM n'a pas nécessité la mise en place d'un protocole de test spécifique, elle s'appuie sur les effacements réalisés pendant l'hiver 2011-2012 dans le cadre du mécanisme d'ajustement et plus particulièrement des *Règles transitoires de mise en œuvre de l'expérimentation Ajustements Diffus* approuvées le 5 décembre 2007 par la Commission de Régulation de l'Énergie.

Les effacements ont en partie été réalisés suite à des activations par RTE de l'entité d'ajustement (EDA) créée par VOLTALIS pour valoriser des effacements dans le cadre du mécanisme d'ajustement (MA). Les effacements ont eu lieu entre le 1er novembre 2011 et le 31 mars 2012 ; ils sont au nombre de 972 dont 443 demandés par RTE dans le cadre du MA. Parmi les 529 effacements non demandés par RTE, 178 effacements sont réduits en durée (10 min) et en volume (baisse très faible de moins de 3 % de la consommation par rapport à la consommation observée avant et après l'effacement). Les usages effacés correspondent à la fois au chauffage électrique et à l'eau chaude sanitaire, sur une variété de sites dont les caractéristiques plus précises ne sont pas détaillées (une majorité de sites résidentiels mais quelques sites avec une puissance souscrite plus élevée). Le nombre de sites concernés est de quelques dizaines de milliers.

Figure 39 – Périodes d'observation du report et de repos



Les ajustements sont en majorité de courte durée (30 minutes), mais il existe également des effacements de plus courte durée et pouvant correspondre notamment à des essais réalisés par VOLTALIS, et quelques activations de longue durée dans le cadre du mécanisme d'ajustement, notamment lors de la vague de froid de février 2012. L'EDA a été régulièrement appelée dans le cadre du mécanisme d'ajustement au cours de l'hiver 2011-2012 ; les activations répétées limitent les occurrences pour lesquelles un report de longue durée est observable.

Pour les besoins de l'étude, VOLTALIS a transmis à RTE les données suivantes :

- Les courbes de consommation des sites composant l'EDA et la courbe de consommation agrégée de l'EDA sur l'ensemble de la période (dans le cadre des règles expérimentales de 2007, RTE ne disposait que des courbes de consommation sur quelques heures avant et après chaque activation) ;
- La liste des ordres d'effacements transmis aux sites et les volumes associés (instants de début et de fin, évaluation par leur méthode propre de l'effacement effectué).

En complément de ces données, RTE s'est basé sur une température synthétique réalisée France, à l'instar de celle utilisée par les modèles de prévision de consommation d'électricité en France (température moyenne pondérée et lissée de 32 stations météorologiques représentatives de la consommation nationale).

Il a été convenu dans le cadre des tests de la méthode GAM de limiter la durée d'observation à 10 heures : toutes les plages de la période d'étude pour lesquelles aucun ordre d'effacement n'est actif depuis au moins 10 heures sont considérées comme des plages au repos ; le report est observé sur les plages consécutives aux effacements et sur une durée maximale de 10 heures.

La période d'observation du report est sans doute trop faible par rapport à la durée réelle du report, et les périodes considérées comme des périodes de repos peuvent intégrer du report. Ceci peut générer deux biais dans l'évaluation du report :

- une mauvaise estimation de la courbe de référence puisque celle-ci est calée sur des périodes pour lesquelles la consommation est modifiée du fait des effacements précédents,
- un report tronqué, la période d'observation étant inférieure à la durée réelle du report.

Pour autant, le biais généré par ces éléments est à relativiser du fait de l'activation régulière des effacements dans le cadre du mécanisme d'ajustement. La courbe de référence est déterminée à partir de la consommation sur l'ensemble des périodes de repos, dont seule une partie est susceptible d'intégrer du report.

Par ailleurs, même si la période d'observation du report est limitée aux 10 heures immédiatement postérieures au dernier effacement activé, elle peut intégrer des effets de bord associés à une succession d'effacements, dans le cas où plusieurs actions d'effacement ont été réalisées dans un laps de temps courts. Le report comptabilisé porte donc non pas sur un seul effacement, mais bien sur plusieurs d'entre eux. Il peut en résulter une majoration du report attribué à un effacement spécifique, et une prise en compte effective du report sur une durée supérieure à 10 h.

1.3 Méthode pour l'évaluation du taux de report

Le modèle utilisé est un modèle de prévision paramétrique de type GAM. Les paramètres explicatifs utilisés sont les suivants :

- le pas de temps dans la journée (composante cyclique) ;
- la température synthétique (la température utilisée est celle utilisée par RTE pour établir la prévision de consommation nationale) ;
- le jour de la période d'étude (arbitrairement, le jour n°1 est le 1er septembre 2011).

L'évaluation se fait alors en trois temps :

- traitement de données et détermination des périodes de repos ;
- calibration du modèle sur les plages de repos (estimation des fonctions qui permettent de rendre compte au plus près de la consommation réalisée sur les périodes des repos, c'est-à-dire sur les périodes considérées comme non influencées par un effacement) ;
- application du modèle pour estimer la courbe de référence sur les plages d'effacement et d'observation du report.

La modélisation initialement proposée par RTE, décrite dans une annexe de la convention VOLTALIS-RTE signée le 26 mars 2015, était différente, elle reposait sur les variables explicatives suivantes :

- le pas de temps dans la journée ;
- la température synthétique ;
- la médiane de la charge sur 24 heures glissantes.

Suite aux échanges menés entre RTE et VOLTALIS, il est apparu que cette modélisation pouvait engendrer des biais compte tenu de la fréquence des effacements réalisés et de la durée du report associée aux effacements, puisque l'une des variables considérées, la médiane de la charge, était susceptible d'intégrer du report lié aux effacements réalisés précédemment. RTE a donc proposé une évolution de la modélisation, en retenant comme variable explicative le jour de la période d'étude. Cette variable permet de prendre en compte une éventuelle évolution de la composition de la capacité durant la période étudiée, ce qui était bien l'effet recherché, en limitant les biais liés à l'intégration de report dans la courbe de référence (avec la nouvelle modélisation proposée, le report résiduel présent dans des périodes considérées comme des périodes de repos a moins d'impact qu'avec la méthode initialement proposée par RTE). Le taux de report moyen initialement obtenu était de 40 %. La nouvelle modélisation retenue a donné lieu à des échanges entre RTE et VOLTALIS de juillet 2015 à septembre 2015.

Par ailleurs, la modélisation initialement proposée portait également spécifiquement, par une modélisation de type GAM également, sur la forme du report (taux de report instantanée en fonction du temps sur les 10 heures suivant un effacement). Cette approche n'a finalement pas été retenue faute de résultats concluants dans les délais impartis : les résultats sont ainsi présentés sous la forme d'un taux moyen associé aux effacements, sans évaluation de la forme précise du report associé à un effacement isolé.

1.3.1 Traitement préalable des données

Un certain nombre de traitements ont été effectués sur la courbe de consommation de l'EDA :

- seuls les effacements d'une durée inférieure à 30 minutes sont conservés, pour les autres la période d'effacement, ainsi que la période d'observation du report sont supprimées (période limitée à 10 heures). Ceci permet d'obtenir un échantillon homogène pour l'évaluation tout en conservant un nombre significatif d'effacements.
- les petits effacements non significatifs sont supprimés, avec « rebouchage des trous associés ». Dans les ordres d'effacement, de nombreux effacements, sans doute correspondant à des essais apparaissent avec des durées et des puissances très faibles), ces effacements ne sont pas pris en compte, et une consommation correspondant à la moyenne entre les deux pas de temps 10 minutes encadrant est prise en compte.

Après ces traitements, 377 effacements sont conservés pour l'étude pour un volume total effacé estimé (à partir des consommations avant et après les effacements) à 4 252 MWh.

VOLTALIS a fait remarquer que la suppression d'effacements significatifs (car d'une durée supérieure à 30 minutes) lorsqu'ils ont lieu moins de 10 heures avant un effacement conservé, engendre un biais : ces effacements peuvent en effet générer un report qui est comptabilisé dans l'étude (alors que l'effacement associé ne l'est pas). Le volume d'effacement ainsi concerné est de 326 MWh, ce qui reste faible au regard des 4 252 MWh d'effacements pris en compte. RTE propose par la suite une évaluation du biais potentiel maximal sur les résultats obtenus.

La répartition de la durée d'observation du report, pour les effacements retenus, est indiquée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 22 – Répartition de la durée d'observation du report après les effacements retenus

Durée d'observation du report	Inférieure ou égale à 2 heures	Inférieure ou égales à 4 heures	Inférieure ou égales à 6 heures	Inférieure ou égales à 8 heures	Inférieure ou égale à 10 heures
Nombre d'effacements concernés	160	268	306	330	377

Le nombre de plages de repos est de 54. La répartition de la durée des plages de repos est indiquée dans le tableau suivant :

Tableau 23 – Répartition de la durée des plages de repos

Durée des plages de repos	Inférieure ou égale à 4 heures	Inférieure ou égales à 6 heures	Inférieure ou égales à 10 heures	Inférieure ou égales à 16 heures	Inférieure ou égale à 30 heures
Nombre de plage de repos	13	23	34	45	52

Il existe deux plages de repos très longues (82 heures et 70 heures) commençant le 24 décembre 2011 à 18 heures et le 30 décembre 2011 à 16 heures. Les autres plages de repos sont majoritairement de courte durée.

1.3.2 Calibration du modèle sur les plages de repos

La calibration du modèle est réalisée sur les plages de repos. La qualité du modèle est évaluée par validation croisée[23] afin de déterminer la meilleure structure et les meilleurs paramètres possibles pour le modèle (l'objectif est de minimiser l'erreur sur la plage de test). Les résultats de la calibration sur les plages de repos et les résultats de la validation croisée sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 24 – Erreur et biais du modèle obtenus dans le cadre de la validation croisée et pour le modèle retenu

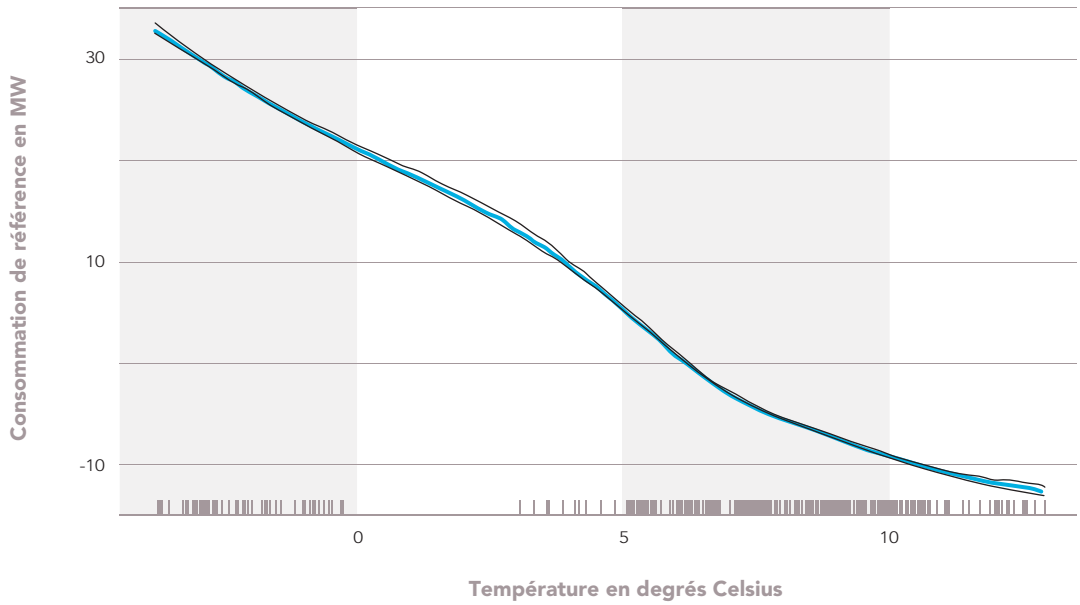
	Erreur sur la plage de calibrage du modèle	Erreur sur la plage de test	Biais sur la plage de paramétrage du modèle	Biais sur la plage de test
Moyenne des 10 modèles après calibration sur 90 % des plages de repos et test sur 10 %	4,6 %	5,8 %	0 %	-0,7 %
Modèle retenu après calibration sur 100 % des plages de repos	4,7 %		0 %	

Le modèle GAM retenu s'appuie sur une modélisation de la courbe de référence définie par trois splines[24] : une spline à 8 nœuds fonction de la température, une spline à 120 nœuds fonction du pas de temps dans la journée, et une spline à 4 nœuds fonction du jour dans l'année. Les trois splines sont représentées dans les graphiques ci-dessous. Sur les axes des abscisses, les petites barres verticales représentent les points du jeu de donnée d'apprentissage.

23. La validation croisée consiste à répéter les opérations suivantes :
   - Découper le jeu de données en K parties (10 par exemple, soit environ 5 plages de repos environ par partie)
   - Calibration du modèle sur une partie des données (90 % par exemple)
   - Test du modèle sur la partie restante (10 %)

   Ceci permet de mieux apprécier la qualité du modèle sur des périodes temporelles qui n'ont pas été utilisées pour son paramétrage.
24. Fonction définie par morceaux par des polynômes.

Figure 40 – Dépendance entre la consommation de référence et la température synthétique



La spline de température est très proche d'un gradient linéaire, comme on peut s'y attendre. On distingue mal le point d'inflexion qui se trouve normalement au-delà de 14°C car on ne dispose pas de période de repos en été. La spline semble bien se comporter malgré l'absence d'échantillon entre 0 et 3°C.

La spline ci-dessous représente le cycle journalier. Elle semble précise, on peut notamment y voir les redémarrages rapides liés aux changements de tranches tarifaires.

Figure 41 – Dépendance entre la consommation de référence et le pas de temps dans la journée

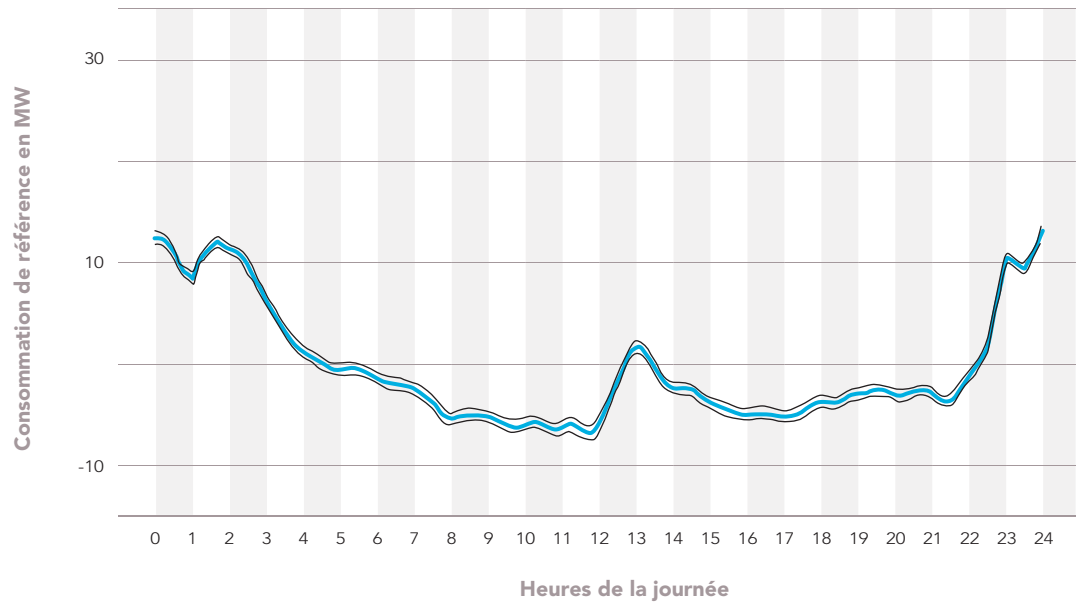
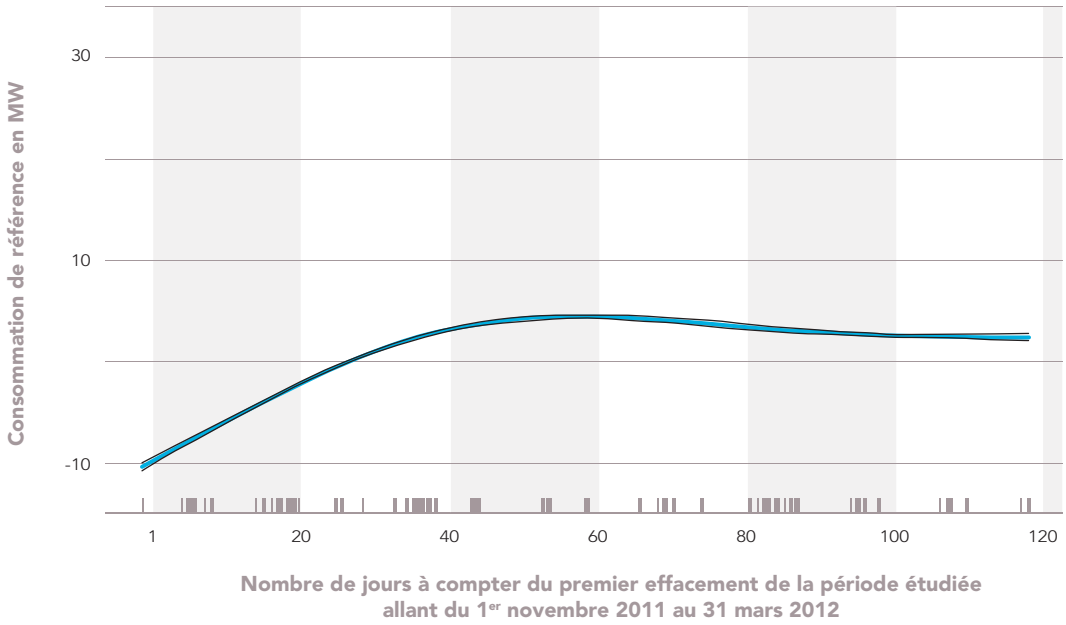


Figure 42 – Dépendance entre la consommation de référence et le jour de la période d'étude



La spline liée au jour de la période d'étude, représentée ci-dessus, semble montrer un accroissement du périmètre étudié en début de période (jusqu'en décembre, puis une stabilité après).

1.3.3 Évaluation du taux de report

Après calibration du modèle GAM sur les plages de repos, la courbe de référence est établie sur l'ensemble des plages d'effacement et d'observation du report pour estimer les volumes reportés par différence avec la courbe de consommation de l'entité d'ajustement. Les volumes d'effacement pris en compte sont ceux communiqués par VOLTALIS.

Ainsi, à chaque effacement i, est associé un volume effacé Veff (i) et un volume reporté Vrep(i) sur la période d'observation suivant l'effacement i (le report ainsi considéré peut être lié à l'effacement i, mais également à des effacements le précédant).

Il est alors possible de calculer un taux moyen de report pour les 377 effacements :

$$Taux\ report = \frac{\sum_{i=1}^{377} \mathrm{Vrep(i)}}{\sum_{i=1}^{377} \mathrm{Veff(i)}}$$

Ainsi le taux calculé constitue une vision moyenne du report qui intègre l'ensemble des effacements réalisés.

Il n'est pas significatif du report associé à un unique effacement ; c'est une limite importante de la méthode d'évaluation présentée ici dont le résultat peut dépendre en partie de la séquence d'effacements mise en œuvre pendant la période d'étude.

1.4 Résultats obtenus et incertitudes associées

Le taux de report obtenu par modélisation des effacements et les périodes d'observation constituant un extrait de la chronique des effacements sur l'hiver 2011-2012 est de 58 %, assorti d'une incertitude que l'on peut tenter de caractériser comme suit.

Des intervalles de confiance sont estimés par ré-échantillonnage des effacements (bootstrap par tirage au sort avec remise des effacements pris en compte pour l'évaluation du report), et également par utilisation de modèles calibrés sur différents sous-ensembles des périodes de repos (bootstrap par tirage au sort avec remise des plages de repos). Les deux sources d'incertitudes représentées par les deux bootstraps sont ensuite agrégées en considérant qu'elles sont indépendantes.

Tableau 25 – Intervalle de confiance obtenu par bootstrap autour du taux de report global pour l'ensemble des effacements considérés

	Taux de report
Quantile 5 %	30 %
Quantile 95 %	91 %

L'intervalle de confiance obtenu par bootstrap est important avec des valeurs de taux de report comprises entre 30 et 90 %.

Comme indiqué supra, il est possible que les effacements non retenus et réalisés dans les intervalles de 10 heures précédant les effacements retenus soient responsables d'une partie du report observé. Dans le pire des cas, le report associé à ces effacements est intégralement observé dans la période qui suit l'effacement suivant. L'impact maximal sur le taux de report calculé peut être évalué à une valeur de -4 %[25], soit 54 %.

1.5 Synthèse des résultats obtenus et limites de la méthode

La méthode présentée et évaluée vise à estimer le taux de report associé à des effacements d'une durée inférieure à 30 minutes, réalisés notamment dans le cadre du mécanisme d'ajustement pendant l'hiver 2011-2012. Le taux obtenu par modélisation de type GAM à partir d'un extrait de la chronique d'effacements de cette période est de 58 % mais présente une dispersion importante (intervalle de confiance obtenu par bootstrap compris entre 30 et 90 %).

Certaines limites de l'évaluation décrites ci-dessus ont pu être identifiées et leur analyse discutée.

D'une part, les durées entre deux effacements consécutifs sont trop faibles pour pouvoir évaluer le report associé à un effacement réalisé de manière isolée. Les nombreuses activations associées à des durées de repos faibles entre deux effacements, ne permettent pas l'évaluation du report moyen associé à un effacement assorti d'une durée et d'une forme précis. Seul un taux global pour l'ensemble des effacements considérés de l'EDA sur la période d'analyse peut être évalué, le taux observé est le résultat de la séquence passée des effacements, sans que l'on puisse être en mesure de caractériser plus précisément la forme et la durée du report associé à un effacement isolé.

De plus, l'activation très régulière des effacements sur toute la période limite la durée des périodes de repos disponibles nécessaires pour calibrer le modèle GAM. Malgré le nombre important d'effacements réalisés (quelques centaines) et de sites impliqués (quelques dizaines de milliers), la précision de l'évaluation est ainsi modérée, tandis que l'intervalle de confiance obtenu par bootstrap est important.

Par ailleurs, la totalité des indicateurs de précision utilisés dans le cadre des travaux sur l'évaluation du report, notamment le pseudo-report, ne peuvent pas être évalués de manière pertinente du fait de la faible durée des plages de repos en regard d'un nombre important d'effacements réalisés.

Enfin, au cours des tests, plusieurs paramétrages de la méthode GAM ont été analysés. Si RTE a retenu celui qui semble le plus performant pour l'évaluation du report, la sensibilité des résultats associés à chacun des tests doit être prise en compte. Elle montre que des analyses supplémentaires restent nécessaires pour mieux appréhender la fiabilité des résultats obtenus.

Selon VOLTALIS, la méthode présente des limites et une instabilité intrinsèque trop importantes pour permettre mieux qu'une mise en évidence qualitative du phénomène de report, telle que RTE en avait déjà présenté les conclusions dans le cadre du REX sur l'expérimentation ajustement diffus, dont sont issus les effacements analysés ici. Les travaux menés pour tenter de rendre la méthode plus robuste n'ont pas permis de surmonter toutes ces limites. Deux chiffres permettent de l'illustrer :

- d'une part, la méthode conduit à effectuer un choix des effacements analysés : n'ont été considérés comme des effacements que les effacements durant moins de 30 min d'une puissance significative à l'échelle globale, tandis que n'étaient pas pris en considération d'autres effacements, par exemple de 10 min. L'avantage de ce choix est de considérer un

25. Cette valeur de -4 % est obtenue en réintégrant tout le volume des effacements supprimés au volume total d'effacement. Le taux obtenu est alors de : 58 % * 5252 / (5252 + 326), soit 54 %.

ensemble homogène d'effacements, afin d'en déterminer le report. L'inconvénient est que ne sont ainsi traités comme effacements que 54 % des volumes des effacements réalisés au cours de la période, laissant une forte incertitude sur l'ensemble.

- d'autre part, l'évaluation aboutit à une grande dispersion des résultats, comme le met en évidence l'intervalle de confiance [30 %-91 %] obtenu ci-dessus. Comme indiqué, cet intervalle est obtenu par ré-échantillonnage (« bootstrap ») : cette technique statistique permet d'évaluer la sensibilité du résultat obtenu à l'échantillon considéré, mais ne permet pas en soi de donner une valeur pour ce résultat, même à travers une moyenne.

En conséquence, VOLTALIS conclut que la méthode ne permet pas d'établir un résultat quantitatif précis, même si elle a l'avantage de mettre en évidence l'existence d'un phénomène de report sur les effacements réels étudiés, au prix des choix de modélisation évoqués.

Selon RTE, ces éléments sont effectivement à considérer dans l'interprétation des résultats – d'un point de vue intrinsèque ou dans le cadre d'une comparaison avec les autres méthodes –, mais ils ne remettent pas en question le chiffrage réalisé à travers la modélisation de type GAM d'un taux moyen de report de 58 % sur la capacité et la période étudiées.

- S'agissant des effacements considérés : contrairement aux autres expérimentations qui reposent sur des effacements réalisés spécifiquement dans le cadre de tests, l'expérimentation GAM présente le mérite de se baser sur des données relatives à une capacité réellement valorisée sur le mécanisme d'ajustement. Les effacements réalisés l'ont donc été soit suite à une demande d'activation de RTE, soit dans le cadre de tests réalisés par VOLTALIS. La définition d'un périmètre homogène pour l'analyse du report est nécessaire dans cette méthode, et le choix proposé (considérer les effacements significatifs en puissance et d'une durée inférieure à 30 minutes) semble cohérent au regard des objectifs de l'évaluation (les effacements successifs de 10 minutes et espacés de 20 minutes n'ont pas été retenus, mais d'autres analyses ont été réalisées dans le présent rapport sur la base de protocoles spécialement conçus pour des effacements de longue durée).
- Sur l'incertitude associée aux résultats présentés : L'intervalle de confiance [30 % ; 91 %] est effectivement important, il ne remet pas pour autant en cause l'intérêt de la méthode pour ce qui concerne l'évaluation de l'ordre de grandeur du report.

En résumé, RTE et VOLTALIS s'accordent pour constater le niveau d'incertitude élevée associée à cette évaluation, mais divergent sur l'exploitabilité des évaluations menées sur la base de la méthode GAM et sa faculté à accréditer la thèse de l'existence d'un report de consommation notable dont l'ordre de grandeur serait selon RTE de 50 % sur la période considérée, et selon VOLTALIS, très incertain et difficilement utilisable au-delà car trop dépendant d'hypothèses choisies pour cette modélisation.

Version établie par RTE et acceptée par Voltalis le 1er mars 2016.

ANNEXE 3
ÉVALUATION DU REPORT POUR UNE MÉTHODE DE TYPE LASSO APPLIQUÉE AUX EFFACEMENTS RÉALISÉS DANS LE CADRE DE L'EXPÉRIMENTATION « UNE BRETAGNE D'AVANCE »

La méthode proposée par la société EDF repose sur une évaluation du report par utilisation d'une méthode statistique de prévision de consommation sur la base notamment des historiques de consommation (de type LASSO) pour constituer la courbe de référence servant à l'évaluation du report.

L'évaluation présentée ci-dessous se base sur des effacements réalisés durant deux hivers (2012-2013 et 2013-2014) par la société EDF dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'Avance » menée dans le cadre du Programme Régional.

ENBRIN (ENergie BRetagne INnovation). Ainsi, les effacements qui servent de base aux analyses ont été réalisés antérieurement à la définition du protocole d'évaluation décrit dans cette annexe. EDF a indiqué que les usages effacés correspondaient uniquement à du chauffage électrique, et que les sites concernés étaient des maisons individuelles localisées en Bretagne. Des effacements ont également été réalisés pendant l'hiver 2014-2015, les données n'ont pas pu être exploitées par RTE dans le cadre de travaux présentés ci-dessous, les délais étant insuffisants.

Les travaux restitués ont été menés dans le cadre d'une convention signée le 20 mai 2015. La description formelle de la méthode proposée par EDF a fait l'objet d'une annexe à la convention. RTE a alors pu débuter les analyses sur la base des données transmises par EDF, de la méthode proposée par EDF, ainsi que de variantes proposées par RTE. Les travaux ont donné lieu entre mai et octobre 2015 à des échanges techniques entre EDF et RTE.

Lors des analyses, RTE a reproduit la totalité des évaluations initialement réalisées par EDF. Ces tests n'ont pas amené RTE à proposer des évolutions fondamentales de la méthode de calcul proposée par EDF. En revanche, certaines données d'entrée non spécifiques aux effacements ont été remplacées par celles de RTE (notamment les températures réalisées). Par ailleurs, RTE a redéfini le mode de calcul des taux de report comme proposé dans la partie 1 de ce rapport (taux fondé sur les ordres d'effacement, taux fondé sur les baisses de consommation constatées). Les résultats présentés dans la suite sont issus de ces variantes proposées par RTE, c'est pourquoi ils diffèrent des résultats initialement obtenus et présentés par EDF dans le cadre d'une des réunions du groupe de travail de la Commission Accès au Marché sur le contrôle du réalisé. Par ailleurs, RTE a mis en œuvre la méthodologie proposée dans le rapport pour évaluer l'incertitude associée aux résultats présentés (distribution de MAPE et MPE, pseudo-report, bootstrap…).

1.1 Résultats présentés par EDF préalables aux travaux réalisés avec RTE

EDF a présenté les résultats obtenus avec la méthode LASSO en juin 2015 lors d'un groupe de travail de la Commission Accès au Marché du CURTE. Ceux-ci concernaient deux types d'effacement : les effacements de 2 fois 2 heures dans la journée (la consommation est effacée sur les périodes 9h-11h et 18h-20h) sur un certain nombre de jours de l'hiver 2012-2013 ; des effacements sur la plage 6h-22h en alternant des ordres d'effacement de 10 minutes et des périodes de repos de 20 minutes sur trois groupes de sites sur un certain nombre de jours de l'hiver 2013-2014. Ces effacements sont détaillés plus précisément dans les paragraphes suivants de cette section.

L'étude avait permis à EDF d'évaluer un taux de report de 35% pour les effacements de 2 fois 2 heures et à un taux de report de 66% pour les effacements de 16 heures. Dans les deux cas, le report apparait être de longue durée et ne semble pas terminé lors d'activation

de l'effacement suivant, notamment dans les cas où les effacements sont réalisés sur plusieurs jours consécutifs (le protocole d'expérimentation n'est pas été initialement conçu dans le but d'observer le report associés aux effacements de consommation).

1.2 Principe général de la méthode LASSO pour l'évaluation du report

La méthode de régression LASSO est une méthode statistique de prévision. Elle s'applique dans le cas où il existe de nombreuses variables explicatives, potentiellement corrélées entre elles.

La méthode LASSO est une régression linéaire sous contraintes qui permet à la fois d'estimer les paramètres et de sélectionner les variables explicatives les plus pertinentes.

$$\hat{\beta}(\tau) = argmin\{||Y_t - X_t\beta||^2 - \tau||\beta||_1\}$$

avec

- Y_t la courbe de référence que l'on souhaite prévoir à l'instant t,
- X_t la matrice des prédicteurs : les températures réalisées à l'instant t et sur les 8 pas de temps tri-horaires précédents, la température normale à l'instant t, la température moyenne journalière et le jour de la semaine.

Pour estimer les paramètres du modèle et conserver les variables explicatives les plus pertinentes dans la régression, la méthode LASSO nécessite de choisir τ la contrainte de pénalisation. On la choisit par validation croisée avec K=10[26]. Une fois ce paramètre fixé, les paramètres du modèle sont estimés sur l'ensemble des données disponibles.

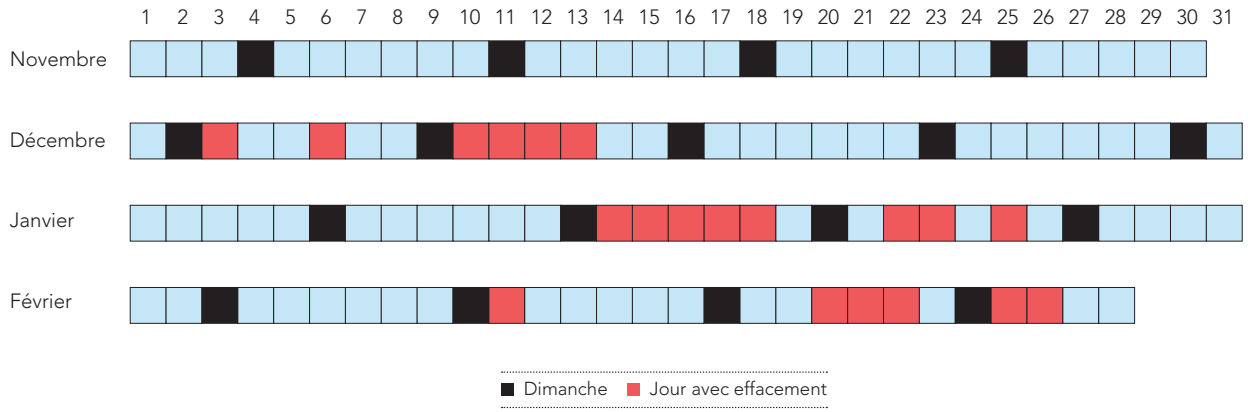
La méthode permet d'établir la courbe de référence après estimation des paramètres sur les plages de repos (plages non influencées par des effacements). Les volumes d'effacement et de report sont ensuite estimés par différence entre la courbe de référence et la consommation réalisée des sites pendant les périodes d'effacement et d'observation du report.

1.3 Tests concernant les effacements réalisés lors de l'hiver 2012-2013

1.3.1 Protocole de test

Les effacements réalisés au cours de l'hiver 2012-2013 ont ciblés des jours froids. Ils sont caractérisés par deux effacements de 2 heures dans la journée, le premier activé de 9h à 11h et le second de 18h à 20h (pour chaque site et chaque journée concernés, les effacements sont activés de manière continue sur deux fois deux heures consécutives). Ainsi, le protocole mis en œuvre permet une évaluation du report associé à des effacements activés de manière continue sur une durée de deux heures, mais également

Figure 43 – Calendrier des effacements



26. La validation croisée consiste à faire plusieurs essais de calage d'un modèle en séparant à chaque fois les données servant à caler le modèle et les données sur lesquelles la qualité du modèle est évaluée. Le meilleur modèle est retenu et les paramètres associés sont évalués sur l'ensemble des données à disposition. Cette méthode de validation croisée permet de disposer d'un modèle plus robuste, moins dépendant de la période de calage.

26. La validation croisée consiste à faire plusieurs essais de calage d'un modèle en séparant à chaque fois les données qui servent à caler le modèle et les données sur lesquelles la qualité du modèle est évaluée. Le meilleur des modèles est retenu et les paramètres sont évalués sur l'ensemble des données à disposition. Cette méthode de validation croisée est intégrée à la régression LASSO et permet de sélectionner les variables. Le choix de K=10 correspond à une valeur raisonnable assez usuelle pour ce type de régression.

d'estimer l'impact éventuel du moment de la journée pendant laquelle l'effacement est mis en œuvre (matin ou soir).

Vingt effacements ont été réalisés entre le 1er décembre 2012 et le 28 février 2013. Les jours ayant donné lieu à des effacements sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 26 – Liste des jours ayant donné lieu à des effacements

Décembre	3, 6, 10, 11, 12, 13
Janvier	14, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 25
Février	11, 20, 21, 22, 25, 26

Pour les besoins de tests, EDF a transmis à RTE les données de consommation de l'ensemble des sites participant à l'expérimentation (244 sites) sur la totalité de la période allant du 1er novembre 2012 au 28 février 2013.

Des données météorologiques ont également été nécessaires :
- les températures réalisées sur les stations de Brest et Rennes (données au pas tri-horaire), celles utilisées proviennent des bases de données de RTE ;
- les températures normales pour les stations de Brest et de Rennes fournies par EDF.

1.3.2 Méthode pour l'évaluation du report

La méthode utilisée dans le cadre des tests est une méthode par prévision reposant sur une régression linéaire sous contrainte de type LASSO. Elle se déroule en trois étapes :
- traitement de données et détermination des périodes de repos ;
- calibration du modèle sur les plages de repos (estimation des fonctions qui permettent de rendre compte au plus près de la consommation réalisée sur les périodes de repos, c'est-à-dire sur les périodes non influencées par un effacement) ;
- application du modèle pour estimer la courbe de référence sur des plages comprenant les effacements et les reports associés et calcul des taux de report en comparant les courbes de référence et les courbes de consommation des sites.

1.3.2.1 Traitement des données

EDF a transmis à RTE les courbes de consommation des sites dès lors que celles-ci contenaient au moins 90% de valeurs renseignées sur la période d'étude (ce choix préalable aux analyses de RTE n'a pas été remis en cause).

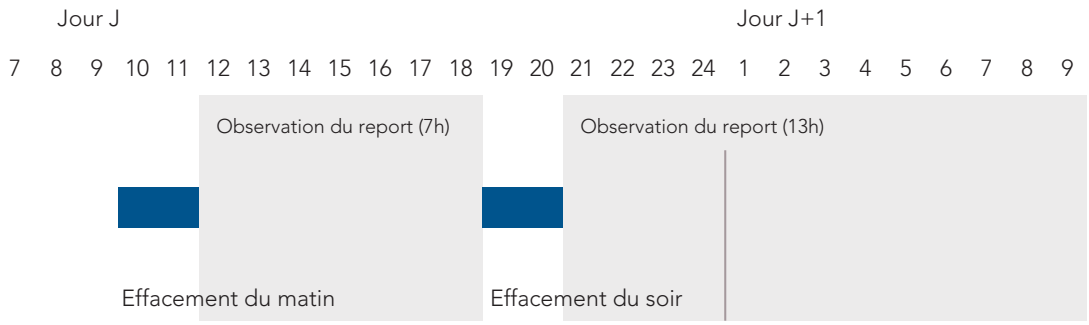
La valeur moyenne de consommation par pas de temps est ensuite calculée, ce qui permet de s'affranchir de la question du remplacement des valeurs manquantes résiduelles.

La période de Noël, considérée comme atypique, est supprimée de l'étude. Ainsi, les jours compris entre le 22 décembre et le 6 janvier ne sont pas pris en compte.

Toutes les périodes disponibles pendant lesquelles aucun effacement n'a été activé depuis au moins 13 heures (durée entre la fin d'un effacement à 20h et le lendemain à 9h) sont considérées comme des plages de repos. Les données transmises par EDF comprennent ainsi 84 jours de repos.

Ainsi, la période d'observation du report associée aux effacements du matin est bornée à 7 heures ; elle est suivie par le second effacement de la journée. La période d'observation associée aux effacements du soir

Figure 44 – Périodes d'effacement et d'observation du report



est bornée à 13 heures ; elle est suivie d'un effacement dans le cas où le jour suivant donne également lieu à des effacements, ou d'une période considérée comme une plage de repos dans le cas contraire.

La période d'observation du report est sans doute trop faible par rapport à la durée réelle du report, et les périodes considérées comme des périodes de repos peuvent intégrer du report. Ceci peut générer deux biais dans l'évaluation du report :

- une mauvaise estimation de la courbe de référence puisque celle-ci est calée sur des périodes pour lesquelles la consommation est modifiée du fait des effacements précédents,
- un report tronqué, l'observation étant inférieure à la durée réelle du report.

Le biais généré par ces éléments est à relativiser du fait de l'activation des effacements sur des jours consécutifs. La courbe de référence est déterminée à partir de la consommation sur l'ensemble des jours de repos, et seul un faible nombre de jours est susceptible d'intégrer du report. Par ailleurs, même si la période d'observation du report est limitée à 7 ou 13 heures après le dernier effacement, elle intègre une part du report lié aux effacements réalisés sur les jours précédents. Une analyse complémentaire pourrait être menée sur l'hiver 2014-15 pendant lequel les effacements ont été activés de manière plus espacée ; il faudrait alors tester le modèle des durées d'observation du report supérieures à 13 heures.

1.3.2.2 Calibration du modèle

La méthode de type LASSO repose sur une régression linéaire, elle est adaptée dans le cas de nombreuses variables explicites, fortement corrélées entre elles. Elle permet de sélectionner les variables explicatives les plus pertinentes parmi celles proposées, ainsi que de déterminer les paramètres associés. Pour l'expérimentation menée en Bretagne, EDF a choisi de retenir les variables explicatives suivantes :

- la température normale à l'instant t ;
- les températures moyennes de Brest et de Rennes pour le jour considéré ;
- les températures moyennes de Brest et de Rennes pour les 8 pas de temps tri-horaires précédents,
- les jours de la semaine (hors dimanche).

Le modèle est ensuite appliqué pour chaque pas de temps d'une journée (144 modèles différents sont donc estimés).

La calibration du modèle est réalisée sur les plages de repos. La qualité du modèle est évaluée par validation croisée : plusieurs modèles sont testées sur les plages de repos en évaluant l'erreur entre la courbe de référence et les données de consommation sur des plages temporelles qui n'ont pas servi à la calibration du modèle. Le meilleur modèle est retenu et ses paramètres sont évalués sur l'ensemble des plages de repos. Les indicateurs de performance sur le modèle retenu figurent dans le tableau ci-dessous.

Le modèle présente un léger biais à la surestimation (MPE positif) de la courbe de référence, qui peut avoir un impact sur la qualité de l'évaluation du report associé aux effacements.

1.3.2.3 Évaluation du taux de report

L'application du modèle permet d'évaluer une courbe de référence sur l'ensemble de la période d'étude. Le report est évalué en comparant la courbe de référence et les données de consommation sur les plages d'effacement et d'observation du report.

Trois configurations de report sont évaluées :

- le report associé à l'effacement du matin, la durée d'observation est alors limitée à 7 heures (de 11 h à 18 h),
- le report associé à l'effacement du soir, la durée d'observation est alors limitée à 13 heures (de 20 h à 9 h),

Tableau 27 – Performance du modèle après calibration sur l'ensemble des données de repos

	MAPE	MPE
Modèle retenu après calibration sur l'ensemble des données du repos	5,3 %	0,5 %

- le report associé à un effacement du matin suivi d'un effacement du soir, les volumes des deux effacements sont ajoutés, la durée d'observation pour le report est la période comprise entre les deux effacements, et la période de 13 heures après l'effacement du soir.

Concernant le calcul des taux, deux modes de calcul sont proposés par RTE :

- le taux fondé sur les ordres d'effacement, la définition de l'effacement est alors basée sur les « ordres d'effacement ». L'effacement d'un site correspond à la baisse de charge qui intervient durant la période d'effacement telle que définie par l'ordre d'effacement adressé à ce site. Les éventuelles baisses ou hausses de consommation ultérieures sont considérées comme des effets de bord, et leur somme algébrique constitue le report. Ainsi, dans le cas présent l'énergie effacée est évaluée sur les périodes 9-11 h et 18 h-20 h, et le report est comptabilisé sur le reste de la période d'observation ;

$$\text{Veff (i)} = \sum_{t\in[9\text{h-}11\text{h}]U[18\text{h - }20\text{h}]} (\text{consommation référence (t)} - \text{consommation réalisée (t)})$$

$$\text{Vrep (i)} = \sum_{t\notin[9\text{h-}11\text{h}]U[18\text{h - }20\text{h}]} (\text{consommation réalisée (t)} - \text{consommation référence (t)})$$

- le taux fondé sur les baisses de consommation constatées, avec cette autre définition, utilisée lors des discussions menées en concertation au cours de l'année 2015, l'effacement du site correspond à l'ensemble de l'énergie effacée, considérée pendant et au-delà de l'ordre d'effacement proprement dit, et l'énergie reportée est prise en compte uniquement après que le rattrapage de consommation a eu lieu. Cette définition permet de prendre en compte le fait que la reprise de consommation peut être différée après la fin de l'effacement, la sous-consommation se prolongeant alors au-delà de la période d'effacement définie par l'ordre envoyé par l'opérateur d'effacement. Dans le cadre de la présente analyse, RTE a choisi de borner la prise en compte de cet effet à 3 heures[27] après la fin des ordres envoyés. Les volumes effacés et reportés sont alors calculés comme suit :

$$\text{Veff (i)} = \sum_{\substack{\text{pas de temps t<3 heures}\\ \text{après fin effacement}}} \max(\text{consommation référence (t)} - \text{consommation réalisée (t)};0)$$

$$\text{Vrep (i)} = \sum_{\substack{\text{pas de temps t<3 heures}\\ \text{après fin effacement}}} \max(\text{consommation réalisée (t)} - \text{consommation référence (t)};0) + \sum_{\substack{\text{pas de temps t>3 heures}\\ \text{après fin effacement}}} (\text{consommation réalisée (t)} - \text{consommation référence (t)})$$

1.3.2.4 Résultats obtenus et incertitude associée

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-contre. Comme indiqué ci-dessus, la durée maximale pour observer le taux de report pour les effacements de 9 h à 11 h est de 7 heures. Pour les autres taux (effacements du soir et taux associé aux deux effacements), la durée maximale d'observation du report est de 13 heures.

Les résultats sont différents suite à des effacements le matin ou à des effacements le soir. En effet, le taux de report fondé sur les baisses de consommation constatées 7 h après l'effacement est de 53% pour un effacement de 18 h à 20 h alors qu'il est de 46% pour un effacement de 9 h à 11 h.

Pour comprendre cette différence, l'observation de la forme du report pour chaque type d'effacement est nécessaire. Les graphiques ci-après montrent donc les écarts, en fonction du temps écoulé depuis le début de l'effacement, entre la consommation de référence et la consommation réalisée rapportés au volume effacé en instantané et en cumul.

Le report ne semble pas terminé 7 heures après la fin d'un effacement de 9 h à 11 h puisque l'écart en cumul continue d'augmenter. Il est donc possible qu'une partie du report reste présente dans la consommation après 18 h.

27. La limite des 3 heures a été proposée par RTE sur la base des premiers travaux réalisés : à cette échéance, sur les cas observés par RTE, le phénomène de consommation semble en effet avoir généralement cessé. Cette limite (qui pourrait être fixée à d'autres niveaux en fonction des observations et des cas de figure rencontrés) permet alors de ne pas comptabiliser comme du report ou de l'effacement les oscillations inévitables entre la courbe de référence et la courbe des sites effacés lorsque les niveaux de consommation sont redevenus proches.

Tableau 28 – Taux de report sur l'hiver 2012-2013

		Taux de report 5 h après l'effacement	Taux de report 7 h après l'effacement	Taux de report 8 h après l'effacement	Taux de report 10 h après l'effacement	Taux de report 13 h après l'effacement
Effacement de 9 h à 11 h	Taux fondé sur les ordres d'effacement	36 %	43 %			
	Taux fondé sur les baisses de consommation constatées	39 %	46 %			
Effacement de 18 h à 20 h	Taux fondé sur les ordres d'effacement	43 %	52 %	54 %	62 %	71 %
	Taux fondé sur les baisses de consommation constatées	45 %	53 %	56 %	63 %	72 %
Report suite aux deux effacements	Taux fondé sur les ordres d'effacement	44 %	48 %	49 %	52 %	57 %
	Taux fondé sur les baisses de consommation constatées	47 %	51 %	52 %	55 %	59 %

Figure 45 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul pour un effacement de 9 h à 11 h

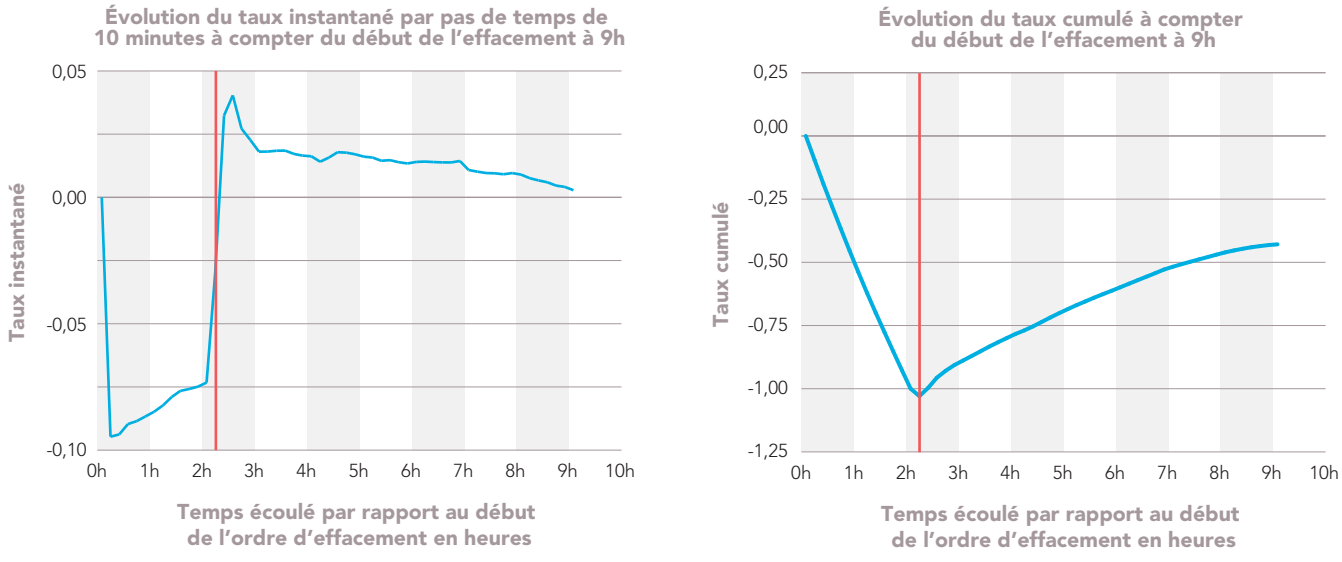
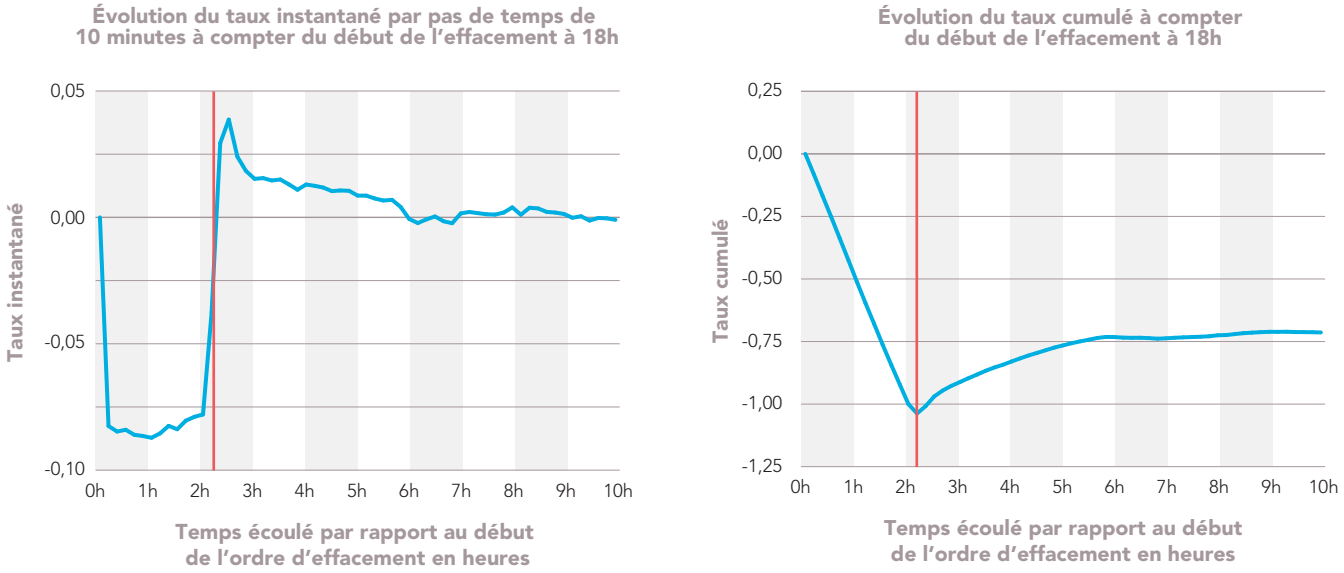


Figure 46 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul pour un effacement de 18 h à 20 h



La forme du report suite à un effacement de 18 h à 20 h est différente de celle suite à effacement de 9 h à 11 h. En effet, le report instantané semble plus élevé sur les 3 heures suivant un effacement de 18 h à 20 h.

Le report ne semble pas terminé 13 heures après la fin d'un effacement de 18 h à 20 h puisque l'écart en cumul continue d'augmenter. Il est donc possible qu'il y ait une partie du report de la veille dans les consommations du lendemain lorsque les effacements s'enchaînent.

• Précision de la courbe de référence

RTE a appliqué sa démarche d'analyse de la courbe de référence telle qu'elle a été présentée au chapitre 2 en évaluant des indicateurs de type MAPE et MPE.

Pour que ces indicateurs donnent des indications relatives à la précision de l'évaluation du report, ils sont calculés sur des plages correspondant au nombre de jours d'effacement :

- 20 jours sont tirés aléatoirement dans les 84 jours de repos,
- le modèle est évalué sur les 64 jours de repos non présents dans le tirage précédent, les MAPE et MPE sont calculés sur les 20 jours issus du tirage en comparant la courbe de référence obtenue en appliquant le modèle retenu et la consommation des groupes,
- cette opération est répétée 100 fois, ce qui permet d'obtenir une distribution de MAPE et de MPE.

Dans le cadre de cette expérimentation, les distributions ainsi obtenues constituent une information complémentaire sur l'incertitude relative à l'évaluation du report.

Ces résultats obtenus figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 29 – Indicateurs de qualité de la courbe de référence sur l'hiver 2012-2013

	MAPE	MPE
Quantile 5 %	5,60 %	-1,30 %
Moyenne	6,50 %	0,80 %
Quantile 95 %	7,70 %	3,20 %

Les indicateurs montrent une précision modérée de la courbe de référence pouvant être liée au faible nombre de sites concernés par les effacements.

Le léger biais du modèle à la surestimation est de nouveau identifiable dans les éléments présentés

ci-dessous. L'analyse du pseudo-report permet d'estimer quel peut être l'impact de ce biais sur l'évaluation du report. Le biais est positif, ce qui signifie que la consommation observée à tendance à être inférieure à la consommation prédite par le modèle. Le taux de report peut donc avoir tendance à être sous-évalué et le volume effacé aura au contraire tendance à être surévalué.

EDF considère que, dans les résultats présentés ci-contre le MPE du quantile 95% étant positif et le MPE du quantile 5% négatif, l'intervalle de confiance inclut 0%. EDF en déduit que l'on ne peut rien conclure sur l'existence d'un biais à la surestimation ou à la sous-estimation de la courbe de référence. En revanche, le fait que le 0% de MPE soit dans l'intervalle de confiance avec peu de variance autour de la moyenne associé au niveau des MAPE permet d'être confiant dans la précision des résultats.

Pour RTE, même si l'intervalle de confiance contient le 0%, le fait que la moyenne soit légèrement décentrée révèle un risque de biais sur l'évaluation du report sans pouvoir le quantifier précisément à ce stade.

• Pseudo-report

RTE a procédé à une évaluation de la méthode en calculant un «pseudo-report» associé à des effacements fictifs. Le pseudo-report a été calculé sur les mêmes tirages de jours de repos que les indicateurs de qualité de la courbe de référence sur la durée de report maximale possible pour chaque effacement. Pour l'effacement de 9h à 11h, la période de report maximale est de 7 heures car l'effacement est toujours suivi d'un autre à 18h. De même la période de report maximale pour un effacement de 18h à 20h est de 13 heures car la plupart des effacements s'enchaînent sur plusieurs jours, donc un effacement redémarre à 9h le lendemain.

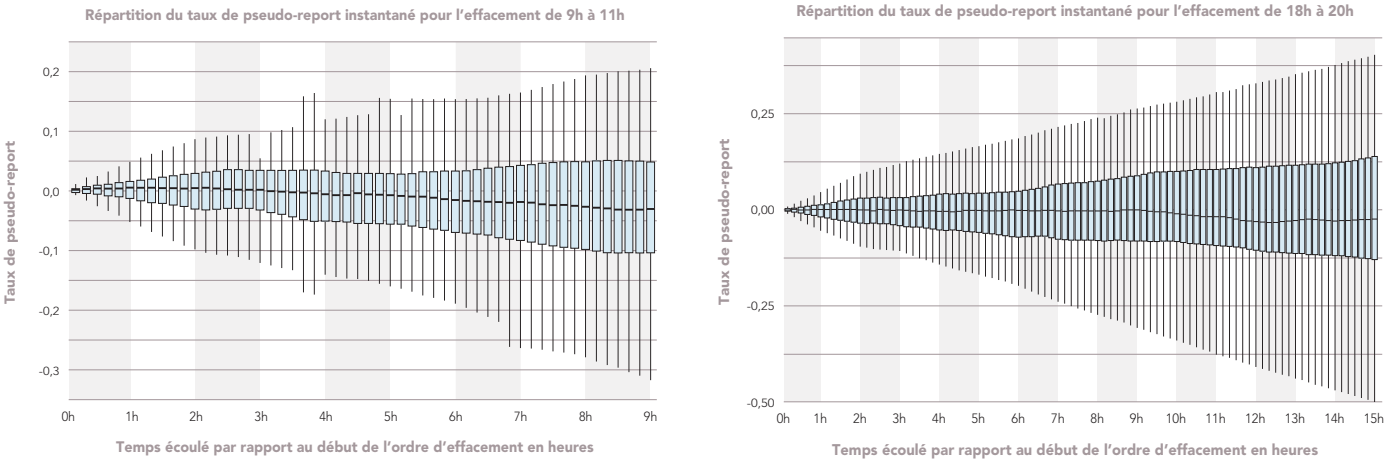
Le pseudo-report est calculé de la même manière que le taux de report sur des périodes de repos de longueurs identiques aux périodes d'observation des effets de bord. Intuitivement le taux attendu doit être proche de 0% puisqu'aucun effacement n'a été réalisé, le cas contraire peut révéler un biais de la méthode testée.

Les pseudo-reports associés aux taux fondés sur les ordres d'effacement sont faibles en moyenne mais dispersés. Le taux est plus dispersé pour l'effacement du soir que pour

Tableau 30 – Pseudo report sur l'hiver 2012-2013

		Pseudo-report associé au taux fondé sur les ordres d'effacement	Pseudo-report associé au taux fondé sur les baisses de consommation constatées
Pseudo-report associé aux effacements de 9h à 11h (7h de report)	Quantile 5%	-17,7%	0,1%
	Moyenne	-2,8%	10,9%
	Quantile 95%	12,2%	22,3%
Pseudo-report associé aux effacements de 18h à 20h (13h de report)	Quantile 5%	-26,4%	-9,6%
	Moyenne	-0,1%	11,7%
	Quantile 95%	27,1%	35,7%
Pseudo-report suite aux deux effacements	Quantile 5%	-16,9%	3,0%
	Moyenne	-1,7%	13,5%
	Quantile 95%	15,5%	26,8%

Figure 47 – Répartition des taux de pseudo-report suivant la durée d'observation



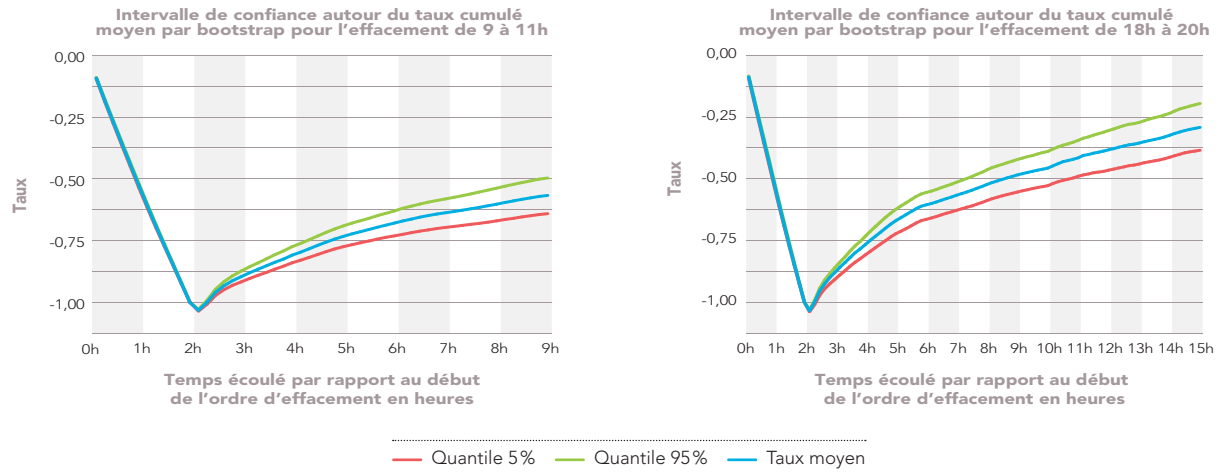
celui du matin. Cela peut être expliqué par la durée d'observation du report. Un taux moyen de pseudo-report de 1,7 % pour l'effacement moyen est acceptable pour l'observation d'un report de l'ordre de 7 heures mais confirme la tendance à la sous-évaluation du taux de report. Le biais important observé sur le pseudo-report fondé sur les baisses de consommation constatées n'est pas significatif : en l'absence d'effacement, l'indicateur intègre les petites oscillations entre la consommation du témoin et la consommation des sites effacés. Ce biais ne se retrouve pas dans les taux de report calculés après des effacements réels.

Les graphiques ci-dessus représentent la répartition des pseudo-reports sur les 100 tirages en fonction de la durée de la période observée. Plus la durée est importante, plus on observe un biais négatif sur le pseudo-report et plus le pseudo-report est dispersé. Ces graphiques permettent de garantir le calcul du taux de report jusqu'à 5 h de report pour les effacements du matin et jusqu'à 8 h de report pour les effacements du soir.

• Analyse de la sensibilité par Bootstrap

Cette analyse consiste à faire de nouvelles estimations par ré-échantillonnage des sites. Elle permet d'évaluer la sensibilité des résultats au choix initial des sites pour réaliser l'étude. C'est l'objet de l'analyse par bootstrap. Le principe général est de reconstituer des échantillons par tirage au sort de sites avec remise. Ainsi un nouvel échantillon est créé avec un nombre identique de sites par rapport

Figure 48 – Dispersion des écarts cumulés de consommation par ré-échantillonnage par groupe et sur l'agrégation



à l'échantillon initial. Cependant, certains sites n'apparaissent plus et d'autres apparaissent plusieurs fois du fait du tirage avec remise. La figure précédente représente le cumul des écarts entre la courbe de consommation et la courbe de référence rapporté au volume d'effacement pour chaque groupe et pour l'agrégation des groupes.

Ainsi, la sensibilité à l'échantillonnage augmente légèrement en fonction de la durée d'observation du report mais ne varie presque pas en fonction de l'heure de l'effacement. L'amplitude de l'intervalle de confiance obtenu par bootstrap 7 heures après la fin de l'effacement est de 14 % pour l'effacement du matin (9 h-11 h) et de 13 % pour l'effacement du soir (18 h-20 h). Ainsi le taux de report 7 heures après l'effacement varie en entre 36 % et 50 % pour l'effacement du matin et entre 45 % et 58 % pour l'effacement du soir. La sensibilité à l'échantillonnage reste néanmoins modérée longtemps après l'effacement. En effet, le taux de report 13 heures après l'effacement du soir varie seulement entre 62 % et 81 %.

1.4 Tests concernant les effacements réalisés lors de l'hiver 2013-2014

1.4.1 Protocole de test de l'hiver 2013-2014

Les effacements réalisés au cours de l'hiver 2013-2014 sont caractérisés par des effacements courts et fréquents sur une longue durée. Les sites sont répartis en trois groupes de taille homogène. Les groupes reçoivent successivement des ordres d'effacement de 10 minutes assortis d'une période de repos. L'effacement global obtenu à partir des trois groupes dure de 6 h à 22 h. Le schéma d'effacement est représenté dans la figure suivante.

L'expérimentation permet donc d'estimer le report à la maille de chaque groupe, mais également le report à la maille des trois groupes agrégés. L'agrégation est obtenue en moyennant la courbe de charge de la totalité des sites.

Quinze effacements ont été réalisés entre le 1er novembre 2013 et le 31 mars 2014. Les jours les plus froids ont été ciblés de préférence, mais il est à noter que l'hiver 2013-2014 a été particulièrement doux et n'a pas permis de tester les effacements lors d'épisodes avec des températures significativement plus basses que les températures normales.

Les jours ayant donné lieu à des effacements sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 31 – Liste des jours ayant donné lieu à des effacements

Décembre	20
Janvier	20, 21, 24, 28, 29, 31
Février	3, 10, 11, 12, 18, 19
Mars	24, 27

Les comportements des jours avec effacement du 20 décembre 2013 et du 24 janvier 2014 sont apparus être très atypiques, ils ont été exclus du périmètre d'évaluation de report qui porte donc sur treize jours d'effacement. Par ailleurs, d'autres effacements ont eu lieu pendant 3 jours avec un schéma différent (effacements entre 8 et 10 heures, puis entre 18 et 20 heures). Ces effacements sont exclus de l'étude.

Pour les besoins de tests, EDF a transmis à RTE les données de consommation de l'ensemble des sites

Figure 49 – Schéma des effacements réalisés lors de l'hiver 2013-2014

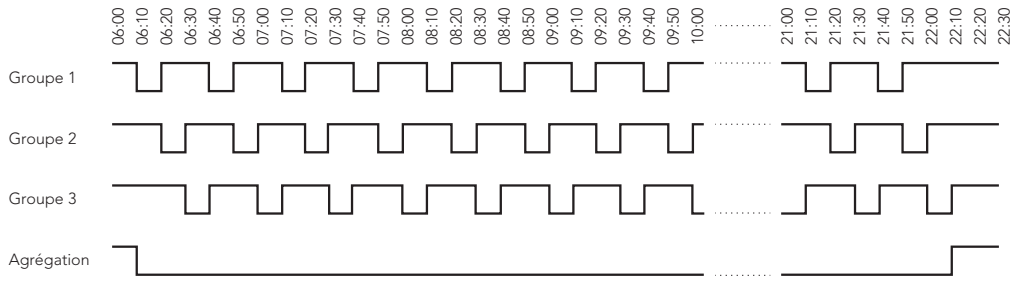
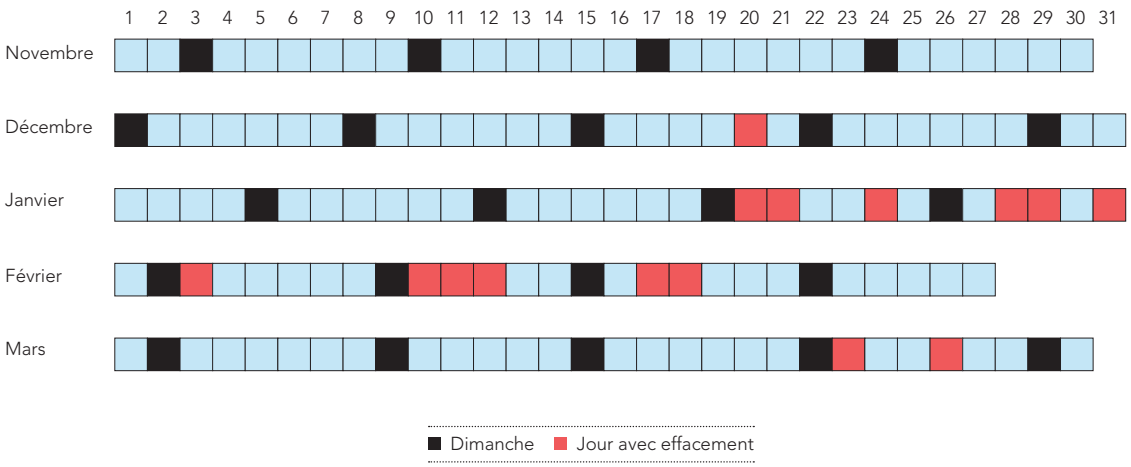


Figure 50 – Calendrier des effacements



participants à l'expérimentation (477 sites) sur la totalité de la période allant du 1er novembre 2013 au 31 mars 2014.

Des données météorologiques ont également été nécessaires :

- les températures réalisées sur les stations de Brest et Rennes (données au pas tri-horaire), celles utilisées proviennent des bases de données de RTE ;
- les températures normales pour les stations de Brest et de Rennes fournies par EDF.

1.4.2 Méthode pour l'évaluation du report de consommation

La méthode utilisée est identique à celle utilisée sur l'hiver 2012-2013 et est détaillée dans le chapitre 2.

1.4.2.1 Traitement préalable des données

Le traitement des données est identique à celui de l'étude sur l'hiver 2012-2013 détaillé au paragraphe 1.3.2.1 et les différences sont spécifiées ci-dessous.

La valeur moyenne de consommation par pas de temps est calculée pour chacun des groupes.

La période de Noël, du 21 décembre au 5 janvier, est supprimée de l'étude.

Toutes les périodes disponibles pendant lesquelles aucun effacement n'a été activé depuis au moins 8 heures sont considérées comme des plages de repos.

Figure 51 – Périodes d'effacement et d'observation du report

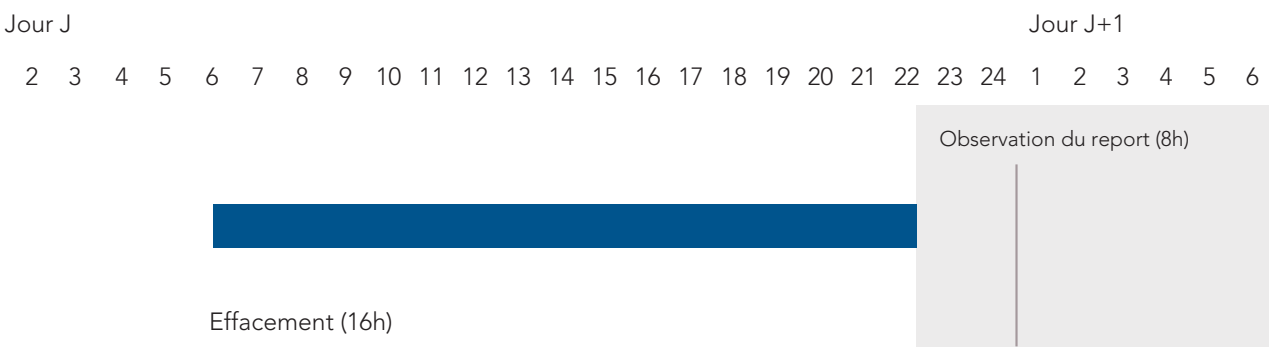


Tableau 32 – Précision de la courbe de référence

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Moyenne des groupes	Tous les sites confondus
MAPE	6,9 %	6,6 %	7,2 %	6,9 %	6,2 %
MPE	0,01 %	0,8 %	0,8 %	0,5 %	0,6 %

De même que pour les effacements de l'hiver 2012-2013, la période d'observation du report (8 heures) est sans doute trop réduite au regard de la durée réelle du report. L'analyse des effacements menés l'hiver 2014-2015 fournirait des éléments complémentaires à cet égard.

1.4.2.2 Calibration du modèle

La calibration du modèle est identique à celle de l'étude sur l'hiver 2012-2013 décrite au paragraphe 1.3.2.2. Les indicateurs de performance sur le modèle retenu figurent dans le tableau ci-dessus.

1.4.2.3 Évaluation du taux de report

L'application du modèle permet d'évaluer une courbe de référence sur l'ensemble de la période d'étude. Le report est évalué en comparant la courbe de référence et les données de consommation sur les plages d'effacement et d'observation du report.

Les effacements longs sont obtenus en adressant des consignes alternativement à trois groupes de sites. Le taux de report a été calculé à des mailles différentes, les taux de report n'étant pas additifs les résultats obtenus seront différents :

- au périmètre de chacun des groupes de sites constitués pour réaliser les effacements,
- au périmètre des trois groupes réunis.

Concernant le calcul des taux, comme précédemment, deux modes de calcul sont proposés :

- le taux fondé sur les ordres d'effacement : l'énergie effacée est évaluée sur les périodes d'effacement (10 minutes toutes les 20 minutes de 6 h à 22 h), et le report est comptabilisée sur le reste du temps ;
- le taux fondé sur les baisses de consommation constatées : toute consommation inférieure à la référence est comptabilisé comme un effacement, toute consommation supérieure comme du report.

1.4.2.4 Résultats obtenus et incertitudes associées

RTE a supprimé 2 effacements de l'étude. En effet, ceux-ci n'ont pas été réalisés toute la journée conformément au protocole de test. Ils ne peuvent donc servir à établir un taux de report moyen pour un effacement type de 16 heures en 3 groupes tournant. Les deux effacements supprimés sont des effacements isolés, ce qui ne laisse que 4 effacements isolés sur les 13 retenus pour l'étude.

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Le taux de report du groupe 2 est différent de celui des deux autres groupes. Cela peut s'expliquer par la composition du groupe en termes de maisons équipées de

Tableau 33 – Taux de report pour l'hiver 2013-2014

	Taux de report à 8 h fondé sur les ordres d'effacement	Taux de report à 8 h fondé sur les baisses de consommation constatées
Groupe 1	61 %	63 %
Groupe 2	48 %	52 %
Groupe 3	67 %	68 %
Moyenne des groupes	59 %	61 %
Agrégation des groupes	27 %	35 %

pilotage de la température intérieure qui elle aussi est différente de celle des groupes 1 et 3.

La forme du report est au contraire identique d'un groupe à un autre. Mais elle est évidemment différente selon que l'on regarde un groupe tournant ou l'agrégation.

Le report n'a pas pu être observé sur une durée de plus de 8 heures puisque la plupart des effacements s'enchaînent sur plusieurs jours de suite. Cependant, il ne semble pas que le report soit terminé après 8 heures puisque le taux cumulé continue d'augmenter.

Les résultats présentés montrent des taux de report inférieurs dans le cas des volumes agrégés par rapport aux résultats par groupe mais ils ne peuvent être comparés toutes choses égales par ailleurs. En effet, dans le cas de l'agrégation, il convient de préciser que l'effacement constaté au niveau de l'agrégat est aussi nettement plus faible car il prend en compte les effets report de certains groupes qui viennent en déduction de l'effacement demandé aux clients.

• Précision de la courbe de référence

RTE a appliqué sa démarche d'analyse de la courbe de référence telle qu'elle a été présentée au chapitre 2 en évaluant des indicateurs de type MAPE et MPE.

Pour que ces indicateurs donnent des indications relatives à la précision de l'évaluation du report, ils sont calculés sur des plages correspondant au nombre de jours d'effacement :

- 13 jours sont tirés aléatoirement dans les 86 jours de repos,
- le modèle est évalué sur les 73 jours de repos non présents dans le tirage précédent, les MAPE et MPE sont calculés sur les 13 jours issus du tirage en comparant la courbe de référence obtenue en appliquant le modèle retenu et la consommation des groupes,
- cette opération est répétée 100 fois, ce qui permet d'obtenir une distribution de MAPE et de MPE.

Dans le cadre de cette expérimentation, les distributions ainsi obtenues constituent une information complémentaire sur l'incertitude relative à l'évaluation du report.

Ces résultats obtenus figurent dans le tableau ci-dessous.

Le modèle semble légèrement biaisé d'après le MPE ; là encore, l'analyse du pseudo-report permet d'estimer si ce biais peut engendrer un impact élevé sur le calcul du report. Les calculs font émerger un biais positif, comme dans l'étude sur l'hiver 2012-2013, ce qui pourra donc entrainer également la sous-évaluation du taux de report.

Par ailleurs, le MAPE semble satisfaisant pour donner une indication de taux de report, d'autant qu'il est peu dispersé d'un groupe à l'autre mais aussi d'un tirage à l'autre.

Tableau 34 – Indicateurs de qualité de la courbe de référence sur l'hiver 2013-2014

	MAPE			MPE		
	Quantile 5%	Moyenne	Quantile 95%	Quantile 5%	Moyenne	Quantile 95%
Groupe 1	6,90%	8,40%	10,00%	-2,30%	1,10%	4,60%
Groupe 2	6,90%	8,10%	9,60%	-2,40%	1,30%	4,40%
Groupe 3	7,50%	8,80%	10,10%	-2,30%	1,50%	5,00%
Moyenne des groupes	7,20%	8,50%	9,90%	-2,10%	1,30%	4,50%
Agrégation des groupes	6,30%	7,60%	9,20%	-2,30%	1,10%	4,30%

Figure 52 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul par groupe et sur l'agrégation



Comme précédemment EDF considère que, comme pour les conclusions tirées des MPE dans le tableau 32, il n'est pas possible de conclure à une surestimation ou sous-estimation de la courbe de référence à partir des MPE calculés ici. En revanche, le fait que le 0% de MPE soit dans l'intervalle de confiance, avec peu de variance, associé au niveau des MAPE permet d'être confiant dans la précision des résultats.

Pour RTE, même si l'intervalle de confiance contient le 0%, le fait que la moyenne soit légèrement décentrée révèle un risque de biais sur l'évaluation du report sans pouvoir le quantifier précisément à ce stade.

• **Pseudo-report**

Le pseudo-report a été calculé sur les mêmes périodes que les indicateurs de qualité de la courbe de référence.

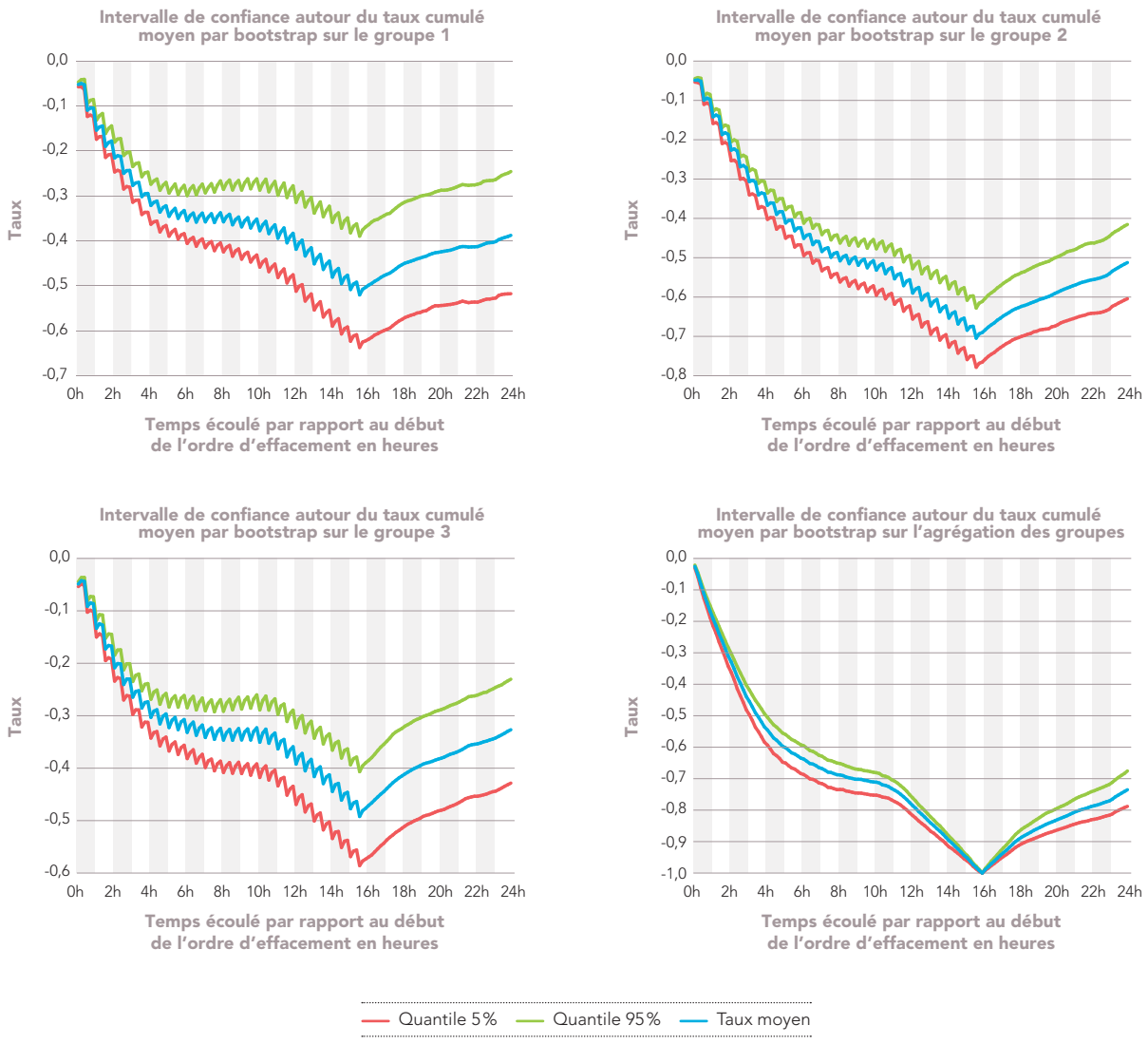
Le pseudo-report est calculé de la même manière que le taux de report sur des périodes de repos de longueurs identiques aux périodes d'observation des effets de bord. Intuitivement il doit être proche de 0% si l'estimation est correcte.

Le pseudo-report associé au taux fondé sur les ordres d'effacement est de -1% en moyenne mais est relativement dispersé. Un taux moyen de pseudo-report de

Tableau 35 – Pseudo report sur l'hiver 2013-2014

		Pseudo-report associé au taux fondé sur les ordres d'effacement	Pseudo-report associé au taux fondé sur les baisses de consommation constatées
Groupe 1	Quantile 5%	-22,7%	6,8%
	Moyenne	-0,9%	22,4%
	Quantile 95%	22,6%	41,4%
Groupe 2	Quantile 5%	-21,0%	4,8%
	Moyenne	-1,1%	19,8%
	Quantile 95%	18,4%	37,2%
Groupe 3	Quantile 5%	-19,4%	8,2%
	Moyenne	-1,1%	21,0%
	Quantile 95%	19,5%	37,3%
Moyenne des groupes	Quantile 5%	-20,6%	6,4%
	Moyenne	-1,1%	21,0%
	Quantile 95%	19,6%	37,9%
Agrégation des groupes	Quantile 5%	-17,9%	7,1%
	Moyenne	-0,7%	30,3%
	Quantile 95%	15,9%	58,5%

Figure 53 – Dispersion des écarts cumulés de consommation par ré-échantillonnage par groupe et sur l'agrégation



-1 % est acceptable pour l'observation d'un report de l'ordre de 8 heures (durée du report testé dans cette expérimentation). Pour les mêmes raisons que précédemment, le biais observé sur le pseudo-report associé au taux fondé sur les baisses de consommation constatées n'est pas interprétable.

• Analyse de la sensibilité par Bootstrap

Cette analyse consiste à faire de nouvelles estimations par ré-échantillonnage des sites. Elle permet d'évaluer la sensibilité des résultats au choix initial des sites pour réaliser l'étude. Le principe général est de reconstituer des échantillons par tirage au sort de sites avec remise. Ainsi de nouveaux groupes sont créés avec un nombre identique de sites par rapport à l'échantillon initial. Cependant, certains sites n'apparaissent plus et d'autres apparaissent plusieurs fois du fait du tirage avec remise. La figure précédente représente le cumul des écarts entre la courbe de consommation et la courbe de référence rapporté au volume d'effacement pour chaque groupe et pour l'agrégation des groupes.

Ainsi, la sensibilité à l'échantillonnage varie d'un groupe à un autre mais reste faible sur les 8 heures d'observation du report. L'amplitude de l'intervalle de confiance obtenu par bootstrap est en moyenne de 22 % sur chacun des groupes et de 11 % sur l'agrégation des groupes. Ainsi le taux de report varie en moyenne entre 48 % et 70 % par groupe et entre 21 % et 32 % sur l'agrégation.

1.5 Synthèse des résultats obtenus et limites de la méthode proposée

La méthode LASSO appliquée aux effacements par EDF sur les hivers 2012-2013 et 2013-2014 aboutit à des taux de report élevés de l'ordre de 60 %, quelle que soit la définition du taux de report (sur les ordres d'effacement ou sur les baisses de consommation constatées). L'incertitude associée est relativement élevée (incertitude estimée à partir du pseudo-report compris dans un intervalle de confiance de [-20 %-+20 %]). Les éléments présentés permettent de confirmer que le report n'est pas terminé 8 heures après la fin des effacements.

Pour EDF, l'incertitude semble limitée au regard des MAPE et des MPE obtenus.

Certaines limites de l'expérimentation ont pu être identifiées.

D'une part, les durées entre deux effacements sont trop faibles pour pouvoir évaluer le report associé à un effacement réalisé de manière isolée. Le protocole retenu avec des activations irrégulières (certaines isolées, d'autres sur des jours groupés) ne permet pas l'évaluation du report moyen associé à un effacement assorti d'une durée et d'une forme précises. Seul un taux moyen peut être constaté, le taux observé est le résultat de la séquence passée des effacements, sans que l'on puisse être en mesure de caractériser plus précisément la forme et la durée du report associé à un effacement isolé. L'analyse des effacements réalisés lors de l'hiver 2014-2015 pourrait donner des résultats complémentaires, le protocole de l'expérimentation prévoyant majoritairement des journées d'effacements isolées suivies de 2 jours sans effacement. Une analyse des données correspondantes aurait donc permis d'évaluer le repos sur une durée plus longue et d'évaluer le report journée d'effacement par journée d'effacement. En second lieu, l'incertitude associée aux résultats est, comme évoqué ci-dessus relativement élevée. Cette incertitude provient notamment du faible nombre de sites impliqués dans l'expérimentation : une application de la méthode à des périmètres plus importants est nécessaire pour confirmer ou lever cette incertitude.

EDF ne partage pas l'analyse de RTE relative à la précision des résultats obtenus. Pour EDF, l'incertitude semble relativement faible au regard des MAPE et MPE obtenus. En outre, l'évaluation du pseudo-report peut être limitée avec la méthode de l'historique dans la mesure où l'évaluation s'effectue sur des jours de repos avec des conditions de température potentiellement différentes par rapport à celles des jours effacés.

Troisièmement, les périodes d'observation du report sont trop réduites (13 heures ou 8 heures), ce qui est susceptible de biaiser les résultats. Cependant, cet élément est à relativiser du fait de l'activation des effacements sur des jours consécutifs (même si la période d'observation du report est limitée à 8 ou 13 heures après le dernier effacement, elle intègre le report des effacements précédents).

Enfin, certaines interrogations spécifiques au modèle utilisé pour réaliser la prévision de consommation (représentativité des températures considérées en entrée du modèle) peuvent être mentionnées. Les données d'apprentissage, qui servent à l'estimation du modèle, ne représentent en effet pas l'ensemble des possibles en termes de températures, en particulier pour les températures froides. Le comportement de la consommation électrique face à des températures froides voire très froides peut ne pas être fidèlement traduit par le modèle résultant. En effet, comme le modèle est estimé à partir de données observées au repos, il n'« apprend » pas sur des jours très froids, les jours d'effacement pouvant être plus froids que les jours au repos. Selon le type d'hiver (rude – doux – très variable), cela aura un impact plus ou moins important sur la validité de la courbe de référence et en conséquence sur le calcul des reports. Cet éventuel biais du modèle ne peut pas être observé avec les indicateurs MAPE, MPE et pseudo-report qui sont tous évalués sur des jours de repos.

Ces observations n'invalident pas l'intérêt général de la méthode de prévision de type LASSO proposée par EDF, mais plaident pour des précautions dans l'utilisation des résultats obtenus dans le cadre de l'étude présentée ici.

Version établie par RTE et acceptée par EDF le 23 février 2016

ANNEXE 4
ÉVALUATION DU REPORT PAR LA MÉTHODE DES PANELS APPLIQUÉE AUX EFFACEMENTS RÉALISÉS DANS LE CADRE DE L'EXPÉRIMENTATION « UNE BRETAGNE D'AVANCE »

La méthode proposée par la société ERDF, gestionnaire de réseau de distribution, repose sur une évaluation du report par la constitution de panels : pendant qu'un groupe de sites s'efface, un panel de sites considéré représentatif permet de constituer la courbe de référence servant à l'évaluation du report.

L'évaluation présentée ci-dessous se base sur des effacements réalisés durant trois hivers (2012-2013, 2013-2014 et 2014-2015) par la société EDF dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'Avance » menée dans le cadre du Programme Régional ENBRIN (ENergie BRetagne INnovation). Ainsi, les effacements qui servent de base aux analyses ont été réalisés antérieurement à la définition du protocole d'évaluation décrit ci-dessous. EDF a indiqué que les usages effacés correspondaient uniquement à du chauffage électrique, et que les sites concernés étaient des maisons individuelles localisées en Bretagne.

Les travaux restitués ont ainsi été menés dans le cadre d'une convention tripartite signée avec ERDF et EDF le 5 octobre 2015, qui encadre l'évaluation de la méthode des panels proposée par ERDF sur la base des effacements réalisés par EDF. La convention précise les régimes de propriété intellectuelle applicables : EDF a développé un procédé visant à estimer le volume de consommation électrique effacée lors de périodes d'effacement diffus qui a fait l'objet d'une demande de brevet, ERDF a mis au point des modalités d'application de la méthode proposée par EDF pour les travaux réalisés dans le cadre de ce rapport.

ERDF précise que pour faciliter une utilisation libre de la méthode en France par l'ensemble des acteurs, EDF et ERDF sont convenus d'une cession par EDF à ERDF de la demande de brevet France, ERDF s'engageant par ailleurs à permettre l'utilisation libre de la méthode par l'ensemble des acteurs en France.

La description formelle de la méthode proposée par ERDF a fait l'objet d'une annexe à la convention. Dans le cadre du protocole visé par la convention tripartite, ERDF a transmis à RTE les données correspondant aux courbes de référence (courbes de consommation des sites miroirs et coefficients de pondération associés), et EDF a transmis à RTE et ERDF les éléments correspondant aux courbes de consommation des sites effacés.

La signature tardive de la convention par rapport aux échéances du rapport n'a néanmoins pas permis à RTE de reproduire l'intégralité des calculs, ni de procéder à toutes les analyses décrites au chapitre 2 du présent rapport portant sur l'évaluation de la précision des résultats obtenus (précision de la courbe de référence, pseudo-report, sensibilité des résultats à la constitution des populations effacée et miroir…). Il a néanmoins semblé pertinent aux parties prenantes de présenter les résultats obtenus à la date de publication du rapport, qui feront l'objet d'analyses ultérieures dans le cadre prévu par la convention.

1.1 Description générale de la méthode des panels

ERDF a présenté dans le cadre du CURTE des modalités de mise en œuvre d'une méthode de contrôle du réalisé permettant de contrôler par sondage le réalisé des effacements activés sur le réseau de distribution. Cette méthode, appelée méthode des panels, consiste à déterminer la quantité d'électricité effacée au sein d'une population de clients à partir de deux panels : le premier constitué d'individus représentatifs de la population étudiée ; le second, miroir du précédent, constitué de clients ayant des caractéristiques similaires à celles de la population effacée, mais n'appartenant pas à cette dernière et non soumis à des effacements de consommation. Les modalités de mise en œuvre

de cette méthode proposées par ERDF permettent de déterminer la courbe de référence du groupe soumis à des effacements de consommation, donc la consommation qu'aurait eue ce groupe s'il n'avait pas été soumis à des effacements.

Les panels sont constitués de manière à reproduire les caractéristiques de sites effacés, ERDF a notamment identifié les critères suivants pour constituer des panels représentatifs : le segment de clientèle (profil utilisé dans le cadre de la reconstitution des flux), le régime d'heures creuses, la localisation géographique, la classe de consommation annuelle.

Les modalités de mise en œuvre de la méthode des panels utilisées dans le cadre des tests, adaptées pour tenir compte des conditions expérimentales, dont les résultats sont décrits ci-dessous repose uniquement sur la constitution des groupes miroirs constitués de sites ne participant pas aux effacements (dans le cadre de cette évaluation, les consommations de l'ensemble des sites participant aux effacements sont utilisées sans recours à la constitution d'un panel représentatif de la population effacée, ce choix est lié au faible nombre de sites participant aux effacements). Les groupes miroirs ont été proposés par ERDF, ils sont constitués de sites résidentiels localisés en région Ouest (Bretagne et Pays de la Loire) et disposent de compteurs à deux cadrans heures pleines/heures creuses, comme c'est le cas pour les sites participant à l'expérimentation « Une Bretagne d'avance ». Une fois le panel constitué, pour chaque pas de temps de la période d'étude, la courbe de référence est obtenue en réalisant une somme pondérée des courbes individuelles des sites constituant le panel miroir. La pondération appliquée à l'instant t est déterminée de façon à minimiser la distance entre la courbe de référence obtenue par pondération des courbes individuelles des clients miroirs et la consommation moyenne de la population effacée, sur une période d'apprentissage, excluant les périodes d'activation des effacements et les périodes définies pour l'observation des effets de bord.

La période d'apprentissage considérée par ERDF dans le cadre de cette étude est constituée des 168 dernières heures précédant l'instant t d'estimation et n'appartenant ni à une période d'effacement ni une période d'observation des effets de bord.

Les coefficients de pondération pour chaque pas de temps et chaque site composant le miroir sont calculés par une régression LASSO visant à donner la meilleure estimation de la courbe de référence sur la période d'apprentissage (dans le cadre de l'application de la méthode LASSO, les coefficients de pondération sont issus d'une validation croisée[28]).

Ainsi, pour chaque pas de temps t, la consommation de référence est calculée comme suit :

$$\textit{Consommation référence (t)} = \sum_{\substack{\textit{site i} \\ \textit{du miroir}}} \text{coefficient pondération (i,t)} \times \text{consommation miroir (i,t)}$$

Où coefficient pondération (i,t) est le coefficient de pondération associé à chaque site i du groupe miroir et pour chaque pas de temps t ; consommation miroir (i,t) est la consommation du site miroir i au pas de temps t.

Ainsi, la consommation de référence issue de la méthode des panels repose à la fois sur :

(i) les consommations des sites effacés et des sites miroirs pendant les périodes d'apprentissage, utilisées pour calculer de manière dynamique les coefficients de pondération associés aux sites miroirs ;

(ii) les consommations réalisées des sites miroirs pendant les périodes d'effacement et d'observation du report de la consommation des sites effacés.

Une étude d'audit de la méthode des panels réalisée par le GENES (Groupe des Ecoles Nationales d'Economie et de Statistique, organisme sous tutelle de l'INSEE) a validé en 2013 l'approche méthodologique proposée par ERDF d'un point de vue statistique et algorithmique.

28. La validation croisée consiste à faire plusieurs essais de calage d'un modèle en séparant à chaque fois les données servant à caler le modèle et les données sur lesquelles la qualité du modèle est évaluée. Le meilleur modèle est retenu et les paramètres associés sont évalués sur l'ensemble des données à disposition. Cette méthode de validation croisée permet de disposer d'un modèle plus robuste, moins dépendant de la période de calage.

1.2 Tests concernant les effacements réalisés lors de l'hiver 2012-2013

1.2.1 Protocole de tests de l'hiver 2012-2013

Les effacements réalisés au cours de l'hiver 2012-2013 ont ciblé des jours froids. Ils sont caractérisés par deux effacements de 2 heures dans la journée, le premier activé de 9h à 11h et le second de 18h à 20h (pour chaque site et chaque journée concernés, les effacements sont activés de manière continue sur deux fois deux heures consécutives). Ainsi, le protocole mis en œuvre permet une évaluation du report associé à des effacements activés de manière continue sur une durée de deux heures, mais également d'estimer l'impact éventuel du moment de la journée pendant laquelle l'effacement est mis en œuvre (matin ou soir).

Vingt jours ont donné lieu à des effacements entre le 1er décembre 2012 et le 28 février 2013, selon le calendrier indiqué ci-dessous.

Tableau 36 – Liste des jours ayant donné lieu à des effacements

Décembre	3, 6, 10, 11, 12, 13
Janvier	14, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 25
Février	11, 20, 21, 22, 25, 26

Pour les besoins de tests, EDF a transmis à RTE et ERDF les données de consommation de l'ensemble des sites participant à l'expérimentation sur la totalité de la période allant du 1er novembre 2012 au 28 février 2013.

1.2.2 Méthode pour l'évaluation du report de consommation

La méthode utilisée est la méthode des panels, elle repose sur l'utilisation des courbes de consommation d'un groupe miroir composé de sites ne participant pas aux effacements. Elle se déroule en quatre étapes :

- le traitement des données de consommation des sites participant à l'effacement,
- la constitution du panel miroir,
- l'estimation de la courbe de référence à partir de la consommation des sites miroirs, après calage sur la consommation des sites effacés,
- l'évaluation proprement dite du taux de report.

1.2.2.1 Traitement des données

EDF a transmis à RTE et ERDF les courbes de consommation des sites dès lors que celles-ci contenaient au moins 90% de valeurs renseignées sur la période d'étude (ce choix préalable aux analyses de RTE n'a pas été remis en cause).

Les données transmises par EDF portaient sur 244 sites dont les courbes de charge ont été exploitées au pas demi-horaire sur la période allant du 1er novembre 2012 au 28 février 2013.

Figure 54 – Calendrier des jours avec effacements

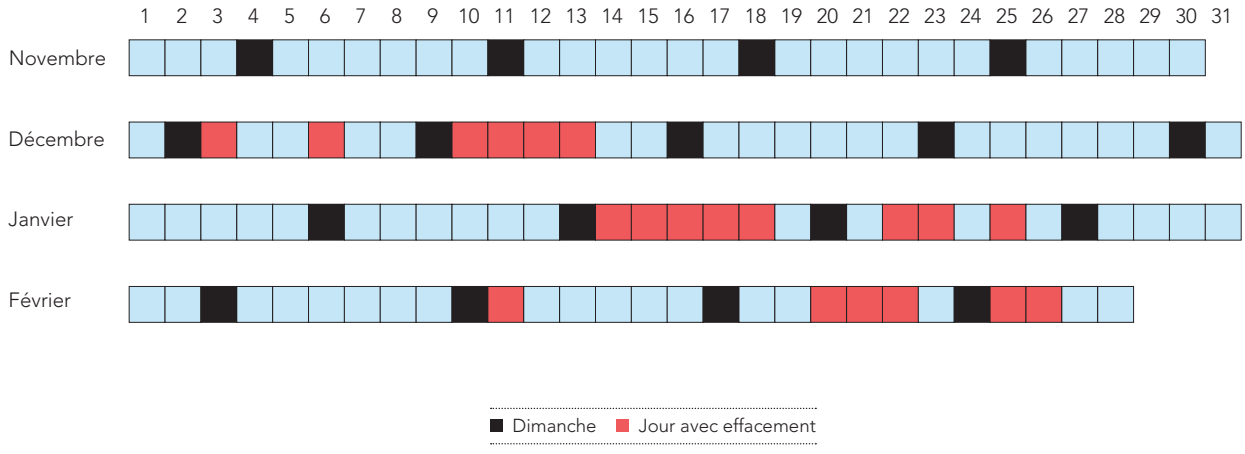
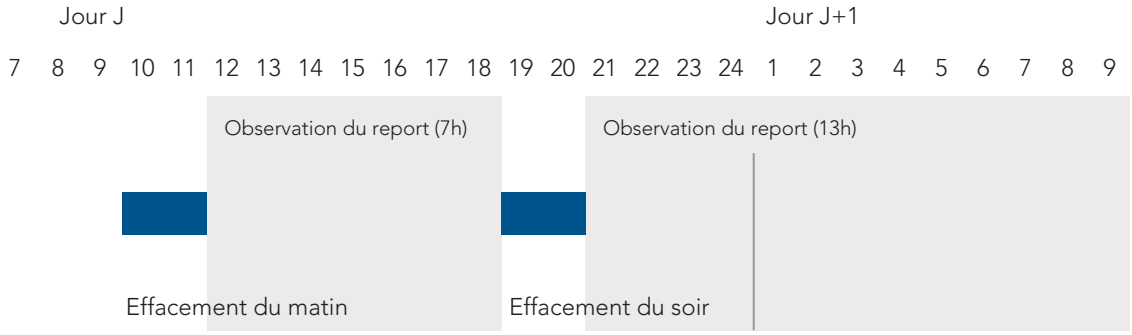


Figure 55 – Périodes d'effacement et d'observation du report



Toutes les périodes disponibles pendant lesquelles aucun effacement n'a été activé depuis au moins 13 heures (durée entre la fin d'un effacement à 20h et le lendemain à 9h) sont considérées comme des plages de repos. Les données transmises par EDF comprennent ainsi 84 jours considérés comme des jours de repos.

La période d'observation du report associée aux effacements du matin est bornée à 7 heures, elle est suivie par le second effacement de la journée ; la période d'observation associée aux effacements du soir est bornée à 13 heures, elle est suivie d'un effacement dans le cas où le jour suivant donne également lieu à des effacements, ou d'une période considérée comme une plage de repos dans le cas contraire.

La période d'observation du report est sans doute trop faible par rapport à la durée réelle du report, et les périodes considérées comme des périodes de repos peuvent intégrer du report. Ceci peut générer deux biais dans l'évaluation du report :

- une mauvaise estimation de la courbe de référence puisque celle-ci est calculée sur des périodes pour lesquelles la consommation est modifiée du fait des effacements précédents,
- un report tronqué, l'observation étant inférieure à la durée réelle du report.

Cependant, le biais généré par ces éléments est à relativiser du fait de l'activation d'effacements sur des jours consécutifs. Par ailleurs, même si la période d'observation du report est limitée à 7 ou 13 heures après le dernier effacement, elle peut intégrer du report lié aux effacements réalisés sur les jours précédents.

1.2.2.2 Constitution du panel miroir

Le panel miroir est constitué de 65 sites localisés dans l'ouest de la France (Bretagne et Pays de la Loire), équipés de compteur à deux cadrans heures pleines/heures creuses. Les courbes de charge comprennent moins de 10% de valeurs manquantes (valeurs non renseignées) et ont été exploitées au pas demi-horaire.

Tous les sites répondant aux caractéristiques voulues (client résidentiel, compteur à deux cadrans heures pleines/heures creuses et localisation en Bretagne ou Pays de la Loire) et pour lesquels ERDF dispose aujourd'hui de courbes de charge au pas demi-horaire ont été retenus pour constituer le panel.

ERDF précise que le vivier des sites miroirs est aujourd'hui peu étoffé, mais que celui-ci sera assurément plus conséquent avec la généralisation des compteurs Linky sur l'ensemble du territoire français à compter du mois de décembre 2015.

1.2.2.3 Estimation de la courbe de référence

La courbe de référence a été calculée par ERDF pour chaque pas de temps par la méthode décrite infra.

La précision de la courbe de référence est estimée par comparaison avec la consommation réalisée des sites effacés sur des périodes de repos, excluant les périodes d'effacement et d'observation des effets de bord (les jours pour lesquels des effacements ont été réalisés sont exclus). Le tableau ci-dessous donne les indicateurs de précision obtenus. Ces indicateurs, évalués sur des périodes de repos, ne prennent pas en compte l'éloignement entre la période d'apprentissage et l'instant de calcul de la courbe de référence quand celle-ci sera évaluée pour les périodes d'effacement et d'observation du

Tableau 37 – Performance du modèle sur les périodes de repos

	MAPE	MPE
Modèle retenu après calibration sur l'ensemble des données du repos	5,6 %	0,2 %

report. En effet, la méthode des panels a la spécificité de recalculer des coefficients à chaque pas de temps à partir des données d'apprentissage les plus proches. Ainsi, sur une période d'effacement ou d'observation des effets de bord, les données d'apprentissage utilisées seront de plus en plus éloignées de l'instant de calcul de la courbe de référence. Et sur une période de repos, la période d'apprentissage sera en général très proche de l'instant de calcul. Les indicateurs présentés ci-dessous donnent donc une vision potentiellement optimiste de la qualité de la courbe de référence dans le cadre de l'évaluation du report.

ERDF considère que la précision d'estimation de la courbe de référence calculée est en pratique très peu optimiste comme le montrent les évaluations plus poussées présentées au § 1.3.3.

Pour RTE, la formulation « potentiellement optimiste » semble appropriée.

Le modèle présente un léger biais à la surestimation (MPE positif) de la courbe de référence, qui peut avoir un impact sur la qualité de l'évaluation du report associé aux effacements. En effet, dans ce cas de figure, le volume reporté peut avoir tendance à être sous-estimé et le volume effacé au contraire à être surestimé, ce qui entraine une éventuelle sous-évaluation du taux de report.

ERDF considère que le léger biais constaté n'est pas de nature à remettre en cause les ordres de grandeurs des taux de report présentés dans le présent rapport.

RTE souligne qu'un biais même léger peut influencer le taux de report de manière plus conséquente.

1.2.2.4 Évaluation du taux de report

Le report est évalué en comparant la courbe de référence et la consommation moyenne des sites effacés pendant les périodes d'effacement et d'observation du report.

Trois taux de report sont évalués :

- le report associé à l'effacement du matin, la durée d'observation est alors limitée à 7 heures (de 11 h à 18 h) du fait de l'activation de l'effacement de l'après-midi,
- le report associé à l'effacement du soir, la durée d'observation est alors limitée à 13 heures (de 20 h à 9 h),
- le report associé à un effacement du matin suivi d'un effacement du soir, les volumes des deux effacements sont ajoutés, la durée d'observation pour le report est la période comprise entre les deux effacements, et la période de 13 heures après l'effacement du soir.

Concernant le calcul des taux, les deux modes de calcul proposés par RTE ont été retenus :

- le taux fondé sur les ordres d'effacement, la définition de l'effacement est alors basée sur les « ordres d'effacement ». L'effacement d'un site correspond à la baisse de charge qui intervient durant la période d'effacement telle que définie par l'ordre d'effacement adressé à ce site. Les éventuelles baisses ou hausses de consommation ultérieures sont considérées comme des effets de bord, et leur somme algébrique constitue le report. Ainsi, dans le cas présent l'énergie effacée est évaluée sur les périodes 9 h-11 h et 18 h-20 h, et le report est comptabilisé sur le reste de la période d'observation ;

$$Veff(i) = \sum_{[9h\text{-}11h] \cup [18h\text{-}20h]} (\text{consommation référence (t)} - \text{consommation réalisée (t)})$$

$$Vrep(i) = \sum_{t \notin [9h\text{-}11h] \cup [18h\text{-}20h]} (\text{consommation réalisée (t)} - \text{consommation référence (t)})$$

- le taux fondé sur les baisses de consommation constatées, avec cette autre définition, utilisée lors des discussions menées en concertation au cours de l'année 2015, l'effacement du site correspond à l'ensemble de l'énergie effacée, considérée pendant et au-delà de l'ordre d'effacement proprement

dit, et l'énergie reportée est prise en compte uniquement après que le rattrapage de consommation a eu lieu. Cette définition permet de prendre en compte le fait que la reprise de consommation peut être différée après la fin de l'effacement, la sous-consommation se prolongeant alors au-delà de la période d'effacement définie par l'ordre envoyé par l'opérateur d'effacement. Dans le cadre de la présente analyse, RTE a choisi de borner la prise en compte de cet effet à 3 heures[29] après la fin des ordres envoyés. Les volumes effacés et reportés sont alors calculés comme suit :

$$Veff(i) = \sum_{t<3 \text{ heures après fin effacement}} \max(\text{consommation référence}(t) - \text{consommation réalisée}(t);0)$$

$$Vrep(i) = \sum_{t<3 \text{ heures après fin effacement}} \max(\text{consommation réalisée}(t) - \text{consommation référence}(t);0) + \sum_{t>3 \text{ heures après fin effacement}} (\text{consommation réalisée}(t) - \text{consommation référence}(t))$$

1.2.3 Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous. Comme indiqué ci-dessus, la période maximale pour calculer le taux de report pour un effacement de 9 h à 11 h ou pour un effacement moyen est de 7 h.

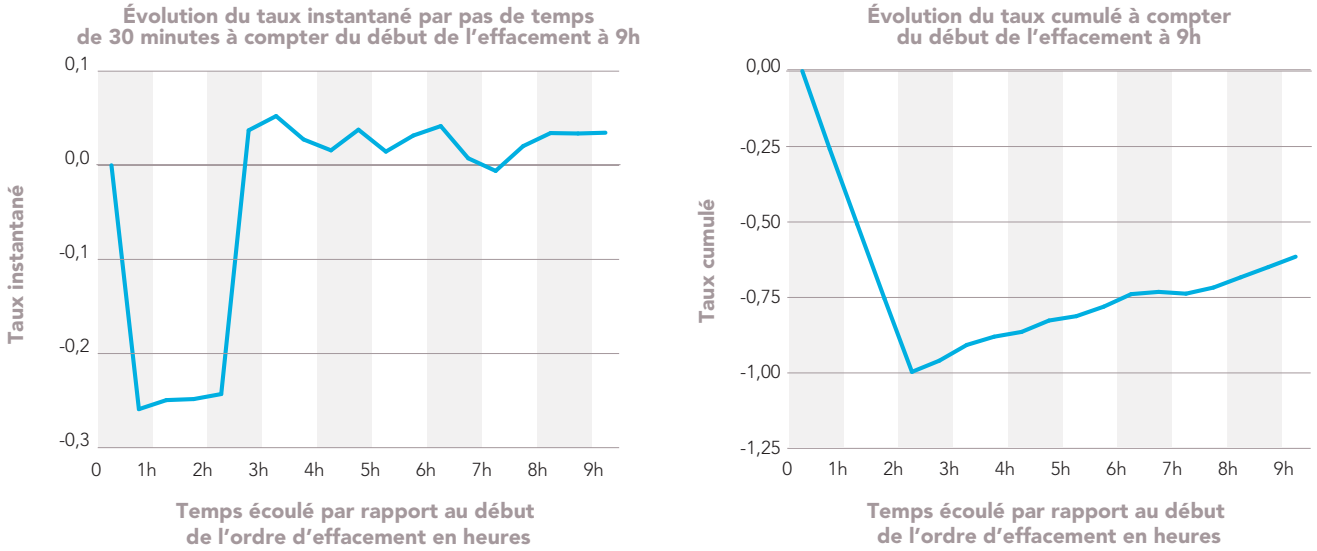
Les taux de report sont différents après des effacements le matin ou des effacements le soir. En effet,

Tableau 38 – Taux de report obtenus avec la méthode des panels sur l'hiver 2012-2013

		Taux de report 5 h après l'effacement	Taux de report 7 h après l'effacement	Taux de report 8 h après l'effacement	Taux de report 10 h après l'effacement	Taux de report 13 h après l'effacement
Effacement de 9 h à 11 h	Taux fondé sur les ordres d'effacement	26 %	38 %			
	Taux fondé sur les baisses de consommation constatées	27 %	39 %			
Effacement de 18 h à 20 h	Taux fondé sur les ordres d'effacement	52 %	71 %	78 %	93 %	112 %
	Taux fondé sur les baisses de consommation constatées	52 %	71 %	78 %	93 %	112 %
Report suite aux deux effacements	Taux fondé sur les ordres d'effacement	38 %	53 %	57 %	63 %	72 %
	Taux fondé sur les baisses de consommation constatées	39 %	54 %	58 %	64 %	73 %

29. La limite des 3 heures a été proposée par RTE sur la base des premiers travaux réalisés : à cette échéance, sur les cas observés par RTE, le phénomène de consommation semble en effet avoir généralement cessé. Cette limite (qui pourrait être fixée à d'autres niveaux en fonction des observations et des cas de figure rencontrés) permet alors de ne pas comptabiliser comme du report ou de l'effacement les oscillations inévitables entre la courbe de référence et la courbe des sites effacés lorsque les niveaux de consommation sont redevenus proches.

Figure 56 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul pour un effacement moyen de 9 h à 11 h

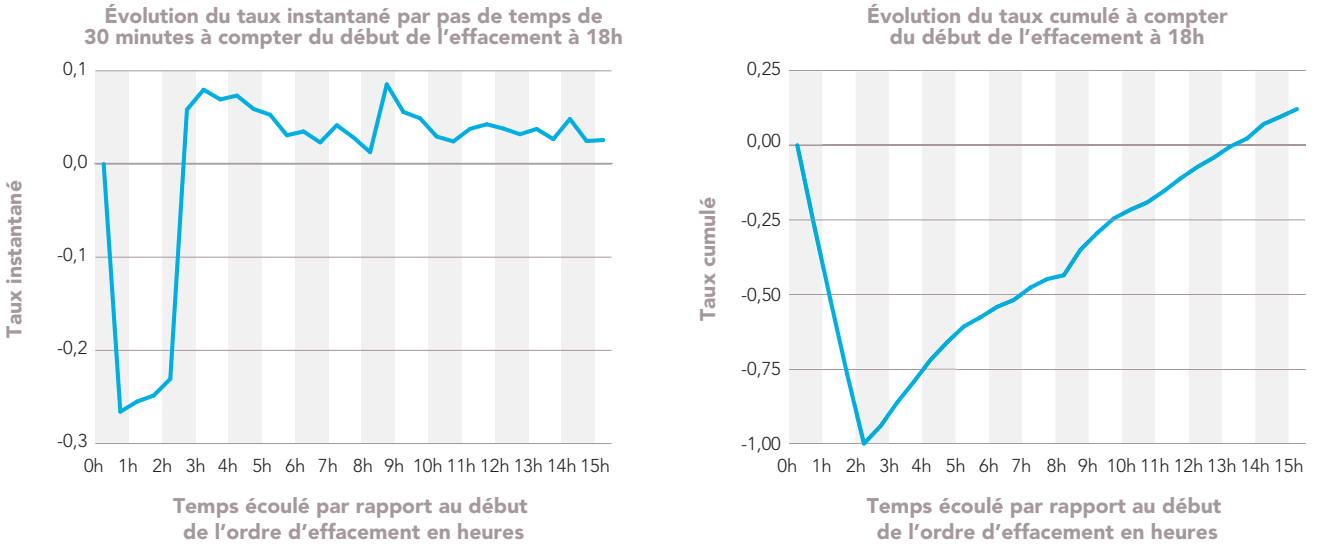


le taux de report fondé sur les baisses de consommation constatées 7 h après l'effacement est de 71 % pour un effacement de 18 h à 20 h alors qu'il est de 39 % pour un effacement de 9 h à 11 h.

Pour comprendre cette différence, l'observation de la forme du report pour chaque type d'effacement est nécessaire. Les graphiques ci-dessus montrent donc les écarts, en fonction du temps écoulé depuis le début de l'effacement, entre la consommation de référence et la consommation réalisée rapportés au volume effacé en instantané et en cumul.

Le report ne semble pas terminé 7 heures après la fin d'un effacement de 9 h à 11 h puisque l'écart en cumul continue d'augmenter. Il est donc possible qu'une partie du report soit présent dans la consommation après 18 h.

Figure 57 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul pour un effacement moyen de 18 h à 20 h



La forme du report suite à un effacement de 18h à 20h est différente de celle suite à un effacement de 9h à 11h. En effet, le report instantané semble plus élevé sur les 7 heures suivant un effacement de 18h à 20h.

Le report ne semble pas terminé 13 heures après la fin d'un effacement de 18h à 20h puisque l'écart en cumul continue d'augmenter mais le taux de report est néanmoins élevé (112%). Ce taux supérieur à 100% peut être lié aux effacements rapprochés, le report observé après un effacement intègre une partie du report associé aux effacements précédemment réalisés.

1.3 Tests concernant les effacements réalisés lors des hivers 2013-2014 et 2014-2015

1.3.1 Protocoles de test des hivers 2013-2014 et 2014-2015

Les effacements réalisés au cours de l'hiver 2013-2014 sont des effacements courts et fréquents sur une longue période. Les sites sont répartis en trois groupes de taille homogène. Les groupes reçoivent successivement des ordres d'effacement de 10 minutes assortis d'une période de repos de 20 minutes. L'effacement global obtenu à partir des trois groupes dure de 6h à 22h. Le schéma d'effacement est représenté dans la figure suivante.

Concernant l'hiver 2014-2015, tous les sites ont donné lieu à des effacements synchrones (10 minutes d'effacement, suivies de 20 minutes de repos) de 6h à 22h, un seul groupe a donc été constitué.

L'expérimentation permet donc d'estimer le report au périmètre des trois groupes 1, 2 et 3 pour l'hiver 2013-2014, du seul groupe constitué pour l'hiver 2014-2015, et également le report à la maille des trois groupes agrégés pour l'hiver 2013-2014. Pour chaque périmètre (groupe considéré de manière isolée ou agrégation des trois groupes), la consommation moyenne des sites est calculée.

Quinze effacements ont été réalisés entre le 1er novembre 2013 et le 31 mars 2014. Les jours les plus froids ont été ciblés de préférence, mais il est à noter que l'hiver 2013-2014 a été particulièrement doux et n'a pas permis de tester les effacements lors d'épisodes avec des températures significativement plus basses que les températures normales.

Les jours ayant donné lieu à des effacements sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 39 – Liste des jours ayant donné lieu à des effacements pour l'hiver 2013-2014

Décembre 2013	20
Janvier 2014	20, 21, 24, 28, 29, 31
Février 2014	3, 10, 11, 12, 18, 19
Mars 2014	24, 27

Les comportements des jours avec effacement du 20 décembre 2013 et du 24 janvier 2014 sont apparus être très atypiques, ils ont été exclus du périmètre d'évaluation de report qui porte donc sur treize jours d'effacement. Par ailleurs, d'autres effacements ont eu

Figure 58 – Schéma des effacements réalisés lors de l'hiver 2013-2014

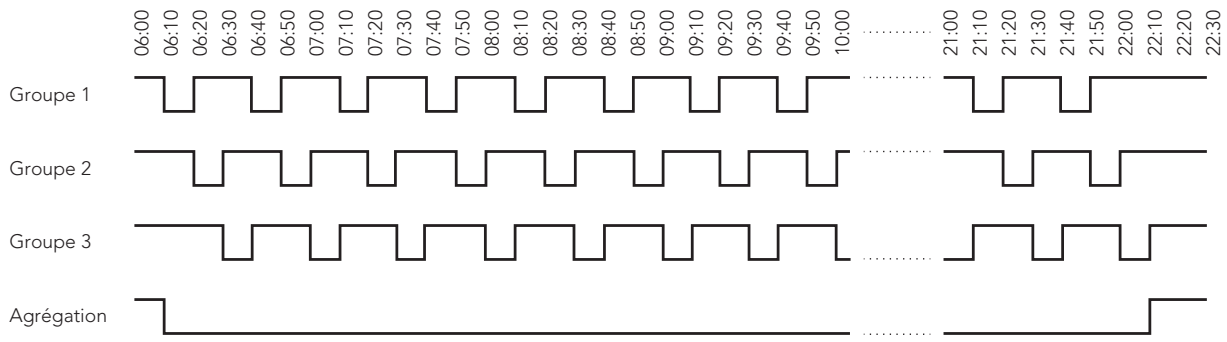
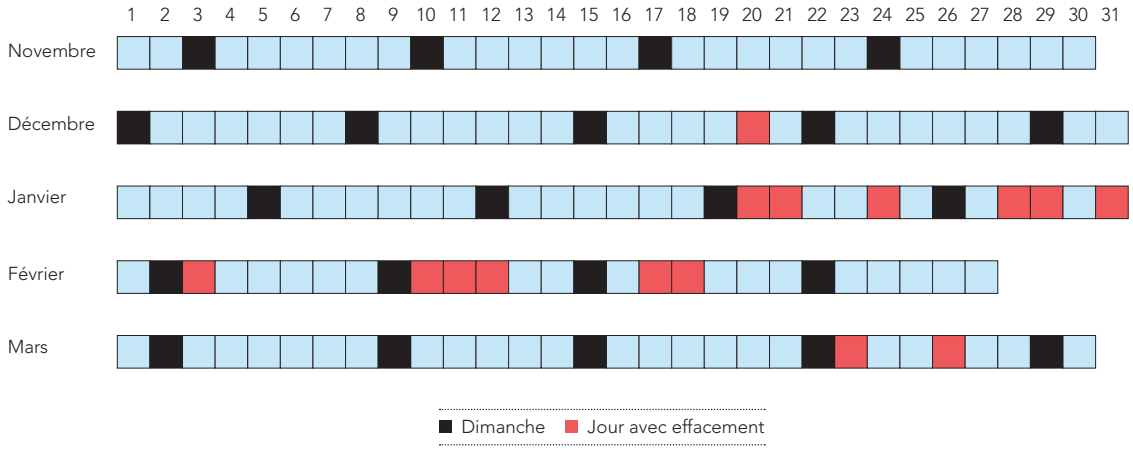


Figure 59 – Calendrier des effacements pour l'hiver 2013-2014



lieu sur 3 jours (30/01, 04/03 et 26/03) avec un schéma différent (effacements entre 8 et 10 heures, puis entre 18 et 20 heures). Ces effacements sont exclus de l'étude.

Concernant l'hiver 2014-2015, seize effacements ont été réalisés entre le 1er novembre 2014 et le 31 mars 2015. Les jours ayant donné lieu à des effacements sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 38 – Liste des jours ayant donné lieu à des effacements pour l'hiver 2014-2015

Décembre 2014	21, 26, 27, 30
Janvier 2015	2, 3, 6, 10, 13, 19, 24
Février 2015	4, 13, 16, 25, 26

Pour les besoins des tests, EDF a transmis à RTE et ERDF les données de consommation de l'ensemble des sites participant à l'expérimentation sur la totalité de la période allant du 1er novembre 2013 au 31 mars 2014 et du 28 décembre 2014 au 28 février 2015.

1.3.2 Méthode pour l'évaluation du report de consommation

La méthode des panels décrite infra a été appliquée par ERDF aux effacements réalisés sur les hivers 2013-2014 et 2014-2015.

1.3.2.1 Traitement préalable des données

EDF a transmis les courbes de consommation des sites dès lors qu'au moins 90% des valeurs étaient renseignées. Au final, les trois groupes sont constitués respectivement de 115, 116 et 109 sites pour l'hiver 2013-2014 et de 277 sites pour l'hiver 2014-2015.

Figure 60 – Calendrier des effacements pour l'hiver 2014-2015

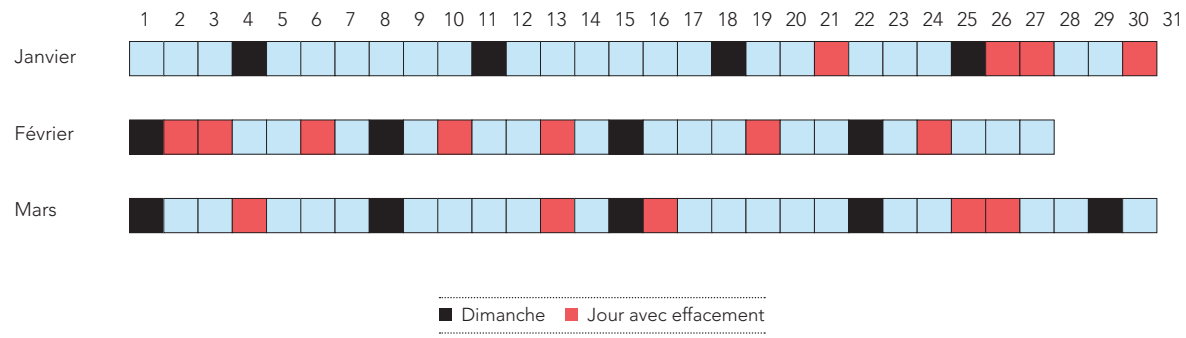
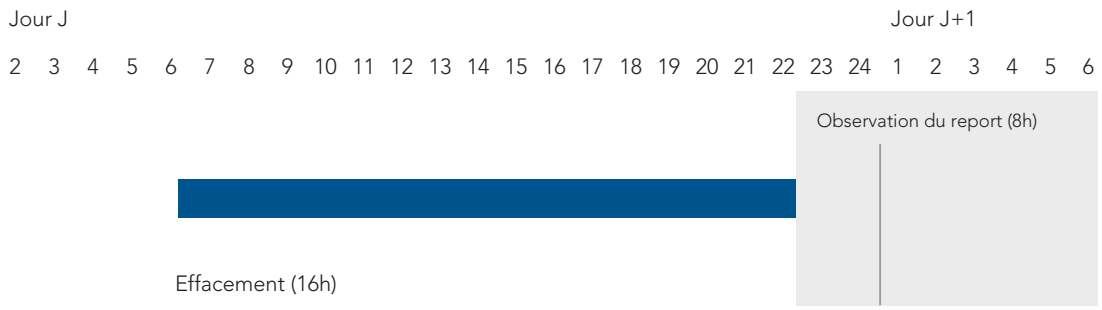


Figure 61 – Périodes d'effacement et d'observation du report



La valeur moyenne de consommation est calculée par pas 10 minutes pour chacun des groupes. Toutes les périodes disponibles pendant lesquelles aucun effacement n'a été activé depuis au moins 8 heures sont considérées comme des plages de repos.

Comme pour l'évaluation concernant l'hiver 2012-2013, la période d'observation du report est sans doute trop faible par rapport à la durée réelle du report, et les périodes considérées comme des périodes de repos peuvent intégrer du report.

1.3.2.2 Constitution des panels miroirs

Des groupes miroirs ont été constitués pour évaluer la consommation de référence des trois groupes de sites constitués dans le cadre de l'expérimentation, ainsi que celle de l'ensemble des sites :

- concernant l'hiver 2013-2014, 96 sites ont été retenus pour constituer le miroir des groupes 1 et 2, ainsi que celui de l'ensemble des sites, 95 sites ont été retenus pour le groupe 3.
- concernant l'hiver 2014-2015, 79 sites ont été retenus pour estimer les courbes de référence.

Les panels miroirs sont constitués de sites localisés dans la région Ouest, équipés de compteur à deux cadrans heures pleines/heures creuses, dont les courbes de charge sont télérelevées à un pas de 10 minutes et comprennent moins de 10% de valeurs manquantes (tous les sites disponibles et répondant à ces caractéristiques ont été utilisés par ERDF).

1.3.2.3 Estimation de la courbe de référence

La courbe de référence est calculée pour chaque pas de temps par la méthode décrite infra, pour les groupes 1, 2 et 3, ainsi que pour la totalité des sites.

Pour chacun des agrégats, les taux de report sont évalués en comparant la consommation de référence et la

Tableau 40 – Performance du modèle sur les périodes de repos pour les deux hivers

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Moyenne des groupes	Tous les sites confondus
			Hiver 2013-2014		
MAPE	8,9%	7,8%	8,1%	8,3%	7,5%
MPE	0,5%	0,4%	0,4%	0,4%	0,2%
			Hiver 2014-2015		
MAPE	8,9%	-	-	-	-
MPE	-0,2%	-	-	-	-

consommation réalisée des sites effacés sur les périodes d'effacement et d'observation du report.

La précision de la courbe de référence est estimée par comparaison avec la consommation réalisée des sites effacés sur des périodes de repos, excluant les périodes d'effacement et d'observation des effets de bord (les jours pour lesquels des effacements ont été réalisés sont exclus). Le tableau 42 donne les indicateurs de précision obtenus.

Comme indiqué précédemment, ces indicateurs donnent une vision potentiellement optimiste de la précision de la courbe de référence.

Pour l'hiver 2013-2014, le modèle présente un léger biais à la surestimation de la courbe de référence, ce qui peut conduire à une relative sous-estimation du taux de report.

En revanche, pour l'hiver 2014-2015, le modèle présente un léger biais à la sous-estimation qui pourrait engendrer une surévaluation du taux de report.

1.3.2.4 Évaluation du taux de report

L'application du modèle permet d'évaluer une courbe de référence sur l'ensemble de la période d'étude. Le report est évalué en comparant la courbe de référence et les données de consommation sur les plages d'effacement et d'observation du report.

Les effacements sont obtenus en adressant des consignes alternativement à trois groupes de sites. Le taux de report a été calculé à des périmètres différents :

- au périmètre de chacun des groupes de sites constitués pour réaliser les effacements,
- au périmètre des trois groupes réunis.

Concernant le calcul des taux, comme précédemment, deux modes de calcul sont proposés :

- le taux fondé sur les ordres d'effacement, l'énergie effacée est évaluée sur les périodes d'effacement (10 minutes toutes les 20 minutes de 6h à 22h), et le report est comptabilisée sur le reste du temps ;
- le taux fondé sur les baisses de consommation constatées, toute consommation inférieure à la référence est comptabilisée comme un effacement, toute consommation supérieure comme du report.

1.3.3 Résultats obtenus et incertitudes associées

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 41 – Taux de report sur les hivers 2013-2014 et 2014-2015

	Taux de report à 8h fondé sur les ordres d'effacement	Taux de report à 8h fondé sur les baisses de consommation constatées
Hiver 2013-2014		
Groupe 1	38%	45%
Groupe 2	33%	41%
Groupe 3	54%	57%
Moyenne des groupes	42%	48%
Agrégation des groupes	19%	25%
Hiver 2014-2015		
Groupe 1	57%	61%

Figure 62 – Évolutions des écarts des consommations rapportés au volume effacé en instantané et en cumulé par groupe et pour l'agrégation des trois groupes pour l'hiver 2013-2014

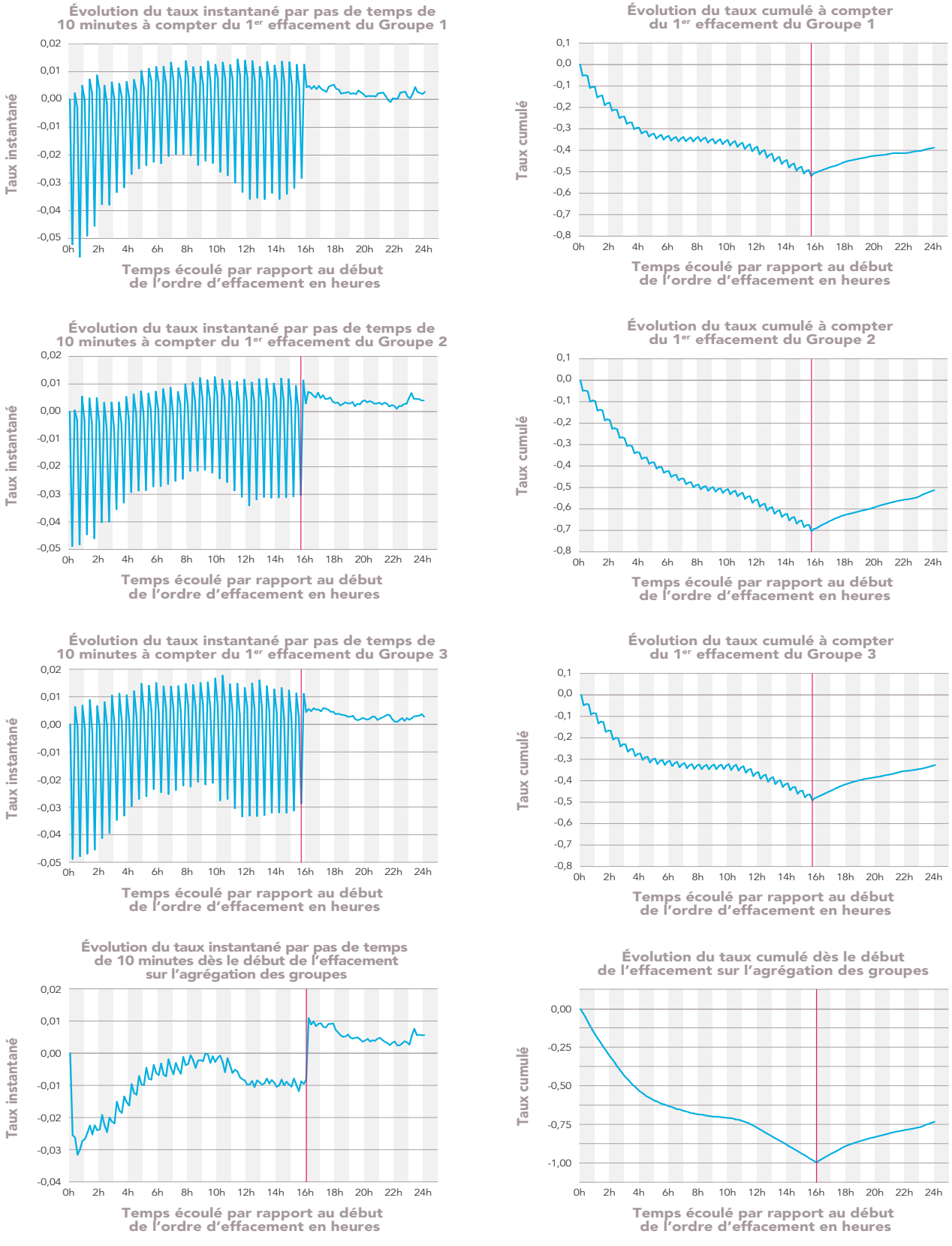
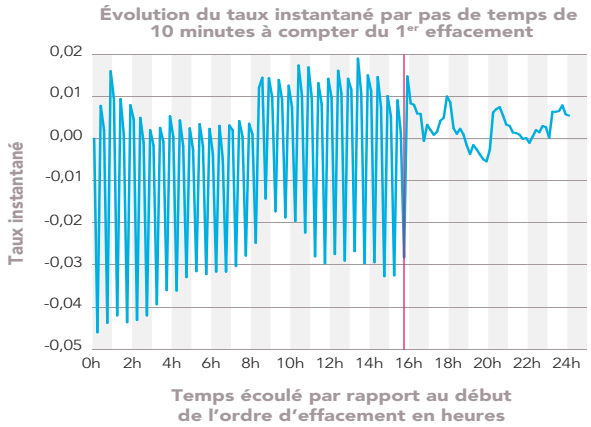
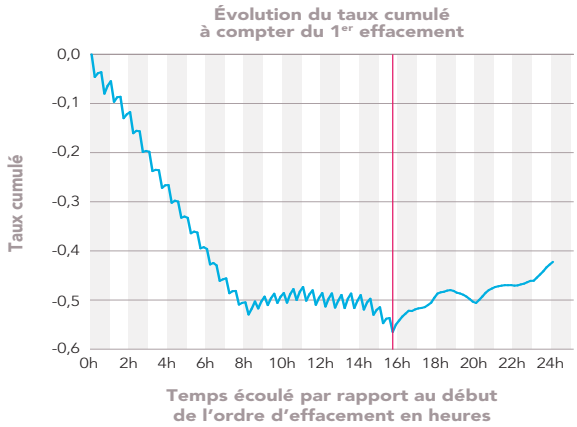


Figure 63 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumulé pour l'hiver 2014-2015 (un seul groupe concerné)





Les résultats présentés montrent des taux de report inférieurs dans le cas des volumes agrégés par rapport aux résultats par groupe mais ils ne peuvent être comparés toutes choses égales par ailleurs. En effet, dans le cas de l'agrégation, il convient de préciser que l'effacement constaté au niveau de l'agrégat est aussi nettement plus faible car il prend en compte les effets report de certains groupes qui viennent en déduction de l'effacement demandé aux clients.

• Précision de la courbe de référence et pseudo-report sur l'hiver 2013-2014

La précision de la courbe de référence est évaluée pour l'hiver 2013-2014 sur des périodes de repos comparables en durée aux périodes d'effacements et d'observation du report (63 tirages de 13 jours avec des jours isolés et de jours successifs pour reproduire les conditions de l'expérimentation). Les résultats figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 42 – Précision de la courbe de référence sur l'hiver 2013-2014

	MAPE			MPE		
	Quantile 5%	Moyenne	Quantile 95%	Quantile 5%	Moyenne	Quantile 95%
Agrégation des groupes	8,43%	9,15%	10,21%	-2,22%	0,35%	3,02%

Les indicateurs montrent une précision modérée de la courbe de référence pouvant être liée au faible nombre de sites dans les populations effacée et miroir.

EDF considère que, dans les résultats présentés ci-dessus, le MPE du quantile 95% étant positif et le MPE du quantile 5% négatif, l'intervalle de confiance inclut 0% et il n'est donc pas possible de conclure sur l'existence d'un biais à la surestimation ou à la sous-estimation de la courbe de référence.

Pour RTE, même si l'intervalle de confiance contient le 0%, le fait que la moyenne soit légèrement décentrée révèle un risque de biais sur l'évaluation du report sans pouvoir le quantifier précisément à ce stade.

• Pseudo-report sur l'hiver 2013-2014

RTE a procédé à une évaluation de la méthode en calculant un «pseudo-report» associé à des effacements fictifs (le volume considéré pour les effacements fictifs est le même que ceux des effacements réalisés). Le pseudo-report est évalué sur des jours de repos pendant lesquels aucun ordre d'effacement n'a été adressé aux sites. Les périodes sont les mêmes que celles utilisées pour calculer la précision de la courbe de référence (63 tirages de 13 jours avec une configuration proche de celle des jours effacés de l'hiver 2013-2014). Le taux attendu est proche de 0% puisqu'aucun effacement n'a été réalisé, le cas contraire peut révéler un biais de la méthode testée. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-contre.

Tableau 43 – Pseudo-report associé à la méthode des panels pour l'hiver 2013-2014

		Pseudo-report associé au taux fondé sur les ordres d'effacement
Agrégation des groupes	Quantile 5%	-8,0%
	Moyenne	5,3%
	Quantile 95%	13,6%

Le pseudo-report est calculé de la même manière que le taux de report sur des périodes de repos de longueur identique aux périodes d'observation des effets de bord.

Les résultats indiquent un biais à la surestimation du taux et une dispersion modérée des résultats.

ERDF souligne donc que l'incertitude sur le report est de l'ordre de 10%.

Comme précédemment, EDF considère que, l'intervalle de confiance incluant 0%, il n'est pas possible de conclure à l'existence d'un biais à la surestimation ou à la sous-estimation du pseudo report.

1.4 Synthèse des résultats obtenus

La méthode des panels appliquée aux effacements réalisés par EDF dans le cadre de l'expérimentation « Une Bretagne d'avance » aboutit à des taux de report élevés compris entre 50% et 70%, avec une incertitude modérée (pseudo-report compris entre -8% et +14%). Les résultats présentés permettent de confirmer que le report n'est pas terminé 8 heures après la fin de l'effacement.

D'une part, les durées entre deux effacements sur les hivers 2012-2013 et 2013-2014 sont trop faibles pour pouvoir évaluer le report associé à un effacement réalisé de manière isolée. Le protocole retenu avec des activations irrégulières (certaines isolées, d'autres sur des jours groupés) ne permet pas l'évaluation du report moyen associé à un effacement assorti d'une durée et d'une forme précises. Seul un taux moyen peut être constaté, le taux observé est le résultat de la séquence passée des effacements, sans que l'on puisse être en mesure de caractériser plus précisément la forme et la durée du report associé à un effacement isolé. Cependant, cet élément est à relativiser du fait de l'activation des effacements sur des jours consécutifs (même si la période d'observation du report est limitée à 8 ou 13 heures après le dernier effacement, elle intègre le report des effacements précédents).

EDF souligne que cette remarque ne s'applique pas pour l'expérimentation portant sur l'hiver 2014-2015 pour laquelle la présence de jours d'effacement majoritairement isolés doit permettre d'évaluer un report sur une durée longue.

En second lieu, l'incertitude associée aux résultats est, comme évoqué ci-dessus, modérée. Cette incertitude provient notamment du faible nombre de sites impliqués dans l'expérimentation (faible nombre de sites participant aux effacements, faible nombre de sites constitutifs des panels miroirs). Une application de la méthode à des périmètres plus importants reste nécessaire pour confirmer ou lever cette incertitude.

Enfin, la convention ayant été signée tardivement, RTE n'a pas pu développer, comme dans le cadre des autres conventions, toutes les analyses permettant d'évaluer les intervalles de confiance associés aux résultats présentés et de tester leur robustesse (le pseudo report a été évalué uniquement sur l'hiver 2013-2014, la sensibilité à la constitution des populations effacée et miroir n'a pas été évaluée). Ces analyses devront être menées à bien dans la suite des travaux.

Ces observations n'invalident pas l'intérêt général de la méthode des panels proposée par ERDF, mais plaident pour des précautions dans l'utilisation des résultats obtenus dans le cadre de l'étude présentée ici, et pour une poursuite des études engagées.

Version établie par RTE et acceptée par EDF et ERDF le 23 février 2016

ANNEXE 5
CARACTÉRISTIQUES DES SIMULATIONS THÉORIQUES

5.1 Paramètres des simulations

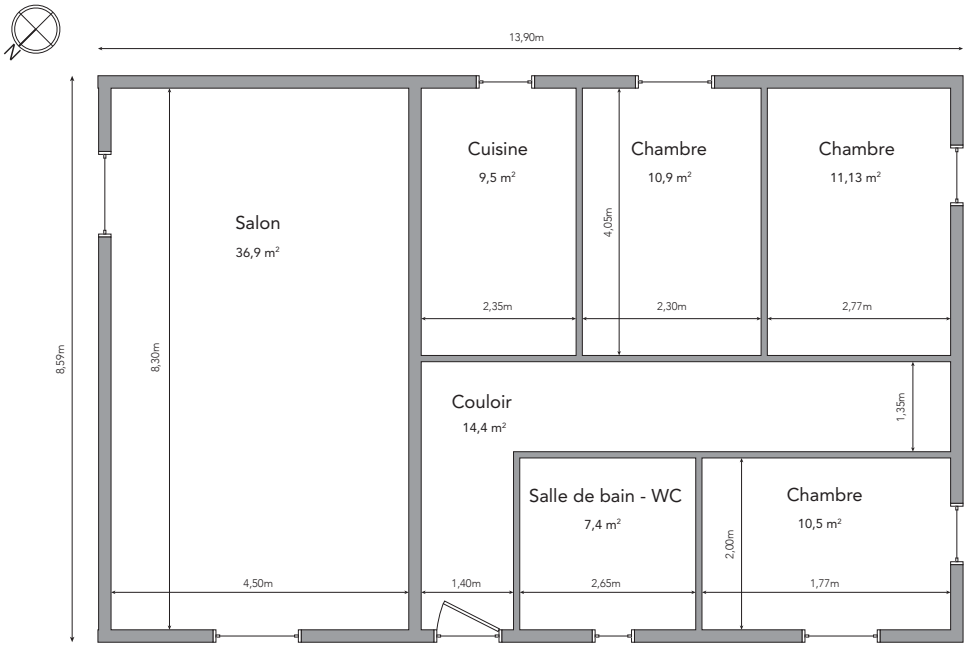
Période de construction	Type de logement	Climat	Thermostat	Régulation	Climat	Type d'efface-ment
Avant 1948 Pavillon ou immeuble de bourg	Maison Puccini Maison Mozart Appartement Gauguin	Nancy Rennes Nice	Intégré	Mécanique PI avec/sans correction de l'auto-échauffement	Normal hiver froid	1, 1bis 2, 2bis 3
1948-1974 Petits collectifs ou barres	Maison Mozart Appartement Gauguin	Nancy Rennes Nice	Intégré	Mécanique PI avec/sans correction de l'auto-échauffement	Normal hiver froid	1, 1bis 2, 2bis 3
1975-1981	Maison Mozart Appartement Gauguin	Nancy Rennes Nice	Intégré	Mécanique PI avec/sans correction de l'auto-échauffement	Normal hiver froid	1, 1bis 2, 2bis 3
1980-1990	Maison Mozart Appartement Gauguin	Nancy Rennes Nice	Intégré Déporté	Mécanique PI avec correction de l'auto-échauffement	Normal hiver froid	1, 1bis 2, 2bis 3
2000-2005	Maison Mozart Appartement Gauguin	Nancy Rennes Nice	Intégré	Mécanique PI avec correction de l'auto-échauffement	Normal hiver froid	1, 1bis 2, 2bis 3
Post 2012	Maison Mozart Appartement Gauguin	Nancy Rennes Nice	Déporté	PI	Normal hiver froid	1, 1bis 2, 2bis 3

5.2 Paramètres des simulations

Puccini
Maison individuelle de 90 m², rez-de-chaussée et un étage



Mozart
Maison individuelle de 100 m² sur un étage.



Gauguin
Appartement de 100 m²



LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Impact d'un effacement sur la courbe de consommation d'un site ou d'un ensemble de sites 19
Figure 2 – Représentation d'un effacement associé d'un report immédiat 19
Figure 3 – Représentation d'un effacement associé d'un report de consommation différé 20
Figure 4 – Conventions de comptabilité des effacements et des effets de bord associés 20
Figure 5 – Calcul du taux de report sur les ordres activés ou sur les baisses de consommation constatées 20
Figure 6 – Exemple numérique de l'impact des différentes conventions de comptabilisation de l'effacement et des effets de bord associés 21
Figure 7 – Exemple d'effacements réalisés à partir de 3 groupes tournants 23
Figure 8 – Deux effacements équivalents pour le système électrique 24
Figure 9 – Représentation d'un effacement d'une heure suivi d'un report de 50 % pendant huit heures 25
Figure 10 – Indicateur de la surconsommation sur les six heures précédant l'effacement 33
Figure 11 – Indicateur de la surconsommation sur les six heures suivant l'effacement 33
Figure 12 – Indicateurs de surconsommation autour de l'effacement mesurés sur les effacements observés sur le mécanisme d'ajustement. 34
Figure 13 – Illustration avec les écarts entre la méthode TED et la variante proposée par RTE 40
Figure 14 – Répartition du parc français par période de construction *(Source RAGE – Règles de l'artGrenelle Environnement – 2012)* 47
Figure 15 – Parts de marché du chauffage électrique *(Source : ADEME, chiffres clés du bâtiment, édition 2013)* 47
Figure 16 – Répartition des types d'équipement pour les logements chauffés à l'électricité *(Source : étude TNS Sofres réalisée en 2011 pour le GIFAM)* 48
Figure 17 – Équilibre thermique d'un bâtiment 49
Figure 18 – Évolution du chauffage et de la température lors d'une baisse de consigne pour des logements à faible et plus forte inertie 50
Figure 19 – Distribution des taux de report obtenus sur les cas test 52
Figure 20 – Évolution du taux report en fonction de la durée des effacements 52
Figure 21 – Taux de report comparés Maison/appartement 52
Figure 22 – Taux de report pour une maison ou un appartement en fonction de la période de construction 53
Figure 23 – Évolution du taux de report matin/soir avec ou sans réduit de nuit 53
Figure 24 – Évolution du taux de report matin/soir pour différents types de maison avec réduit de nuit 53
Figure 25 – profil de report considéré dans les études économiques de valorisation des effacements 57
Figure 26 – Représentation d'un effacement associé d'un report immédiat 65
Figure 27 – Représentation d'un effacement associé à un report de consommation différé 65
Figure 28 – Exemple d'effacements réalisés à partir de 3 groupes tournants 66
Figure 29 – Schéma retenu pour les ordres d'effacements 73
Figure 30 – Les différentes périodes définies pour l'évaluation des effets de bord 74
Figure 31 – Puissance consommée par deux groupes proches sur une période au repos *(Analyse VOLTALIS)* 77
Figure 32 – Bootstrap déterminant le taux de report moyen *(Analyse VOLTALIS)* 78
Figure 33 – Impact des traitements de données sur la courbe de consommation des sites considérés 80
Figure 34 – Courbe moyenne des groupes effacés et des témoins associés 87
Figure 35 – Dispersion des taux de report fondé sur les baisses de consommation constatéesunitaires à 8 h pour les 24 effacements associés à la variante proposée par RTE 89
Figure 36 – Dispersion des écarts cumulés de consommation sur les tirages par ré-échantillonnage dans la variante proposée par RTE 90
Figure 37 – Catégorie de courbes de charge avec reprise immédiate de la consommation après les ordres d'effacement 93
Figure 38 – Catégorie de courbes de charge avec reprise très différée de la consommation après les ordres d'effacement 93
Figure 39 – Périodes d'observation du report et de repos 97
Figure 40 – Dépendance entre la consommation de référence et la température synthétique 100
Figure 41 – Dépendance entre la consommation de référence et le pas de temps dans la journée 100
Figure 42 – Dépendance entre la consommation de référence et le jour de la période d'étude 101
Figure 43 – Calendrier des effacements 105
Figure 44 – Périodes d'effacement et d'observation du report 106
Figure 45 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul pour un effacement de 9 h à 11 h 109
Figure 46 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul pour un effacement de 18 h à 20 h 110
Figure 47 – Répartition des taux de pseudo-report suivant la durée d'observation 112
Figure 48 – Dispersion des écarts cumulés de consommation par ré-échantillonnage par groupe et sur l'agrégation 112
Figure 49 – Schéma des effacements réalisés lors de l'hiver 2013-2014 113
Figure 50 – Calendrier des effacements 114
Figure 51 – Périodes d'effacement et d'observation du report 114
Figure 52 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul par groupe et sur l'agrégation 117
Figure 53 – Dispersion des écarts cumulés de consommation par ré-échantillonnage par groupe et sur l'agrégation 119
Figure 54 – Calendrier des jours avec effacements 124
Figure 55 – Périodes d'effacement et d'observation du report 125
Figure 56 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul pour un effacement moyen de 9 h à 11 h 128
Figure 57 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumul pour un effacement moyen de 18 h à 20 h 128
Figure 58 – Schéma des effacements réalisés lors de l'hiver 2013-2014 129
Figure 59 – Calendrier des effacements pour l'hiver 2013-2014 130
Figure 60 – Calendrier des effacements pour l'hiver 2014-2015 130
Figure 61 – Périodes d'effacement et d'observation du report 131
Figure 62 – Évolutions des écarts des consommations rapportés au volume effacé en instantané et en cumulé par groupe et pour l'agrégation des trois groupes pour l'hiver 2013-2014 133
Figure 63 – Évolution des écarts de consommation rapportés au volume effacé en instantané et en cumulé pour l'hiver 2014-2015 (un seul groupe concerné) 134

Le réseau de l'intelligence électrique

RTE
1, terrasse Bellini TSA 41000
92919 La Défense Cedex
www.rte-france.com

RTE Réseau de transport d'électricité, Société anonyme à Directoire et Conseil de surveillance au capital de 2 132 285 690 e – RCS Nanterre 444 619 258
Mise en page : Good Eye'D – Impression sur papiers issus de forêts gérées durablement.

IMPRIM'VERT®