



Interreg



France (Channel Manche) England

PROJET ICE - LIVRABLE T3.3.1
**UN SYSTEME ENERGETIQUE INTELLIGENT
OPTIMISÉ**
DECEMBRE 2021



LIVRABLE ICE T3.3.1 :

Un système énergétique intelligent optimisé



BRETAGNE
DÉVELOPPEMENT
INNOVATION



TECHNOPÔLE DE
BREST-IROISE

Technopôle
Quimper-Cornouaille

POLE MER
UNIVERSITÉ DE BREST

UNIVERSITY OF
EXETER

PLYMOUTH
UNIVERSITY

UEA
University of Exeter

marine

À propos de ICE

Soutenu par le programme Interreg VA France (Manche) Angleterre, le projet Intelligent Community Energy (ICE) vise à développer davantage la compréhension et à appliquer des solutions énergétiques innovantes et intelligentes pour les zones isolées de la région de la Manche. Les îles et territoires environnants sont confrontés à des enjeux énergétiques spécifiques. De nombreuses îles ne sont pas connectées au réseau électrique européen et dépendent de combustibles fossiles importés, notamment des générateurs de chaleur fonctionnant au fuel. Les solutions énergétiques utilisées ont tendance à être moins fiables, plus coûteuses et émettent des niveaux de gaz à effet de serre plus élevés que le réseau continental européen.

En réponse à ces enjeux, le projet ICE considère l'ensemble du cycle énergétique, de la production à la consommation, et intègre des technologies matures ou nouvelles pour développer des solutions énergétiques innovantes. Ces solutions seront expérimentées et testées sur deux sites pilotes de démonstration (l'île d'Ouessant et le campus de l'Université d'East Anglia), pour prouver leur faisabilité et développer une méthodologie générale pouvant être répliquée sur d'autres territoires isolés ailleurs. Pour transférer cette méthodologie à d'autres territoires isolés, ICE propose une offre de transition commerciale à faible émission de carbone. Cela comprendra une évaluation complète des ressources et des conditions énergétiques locales, une proposition de modèle de transition énergétique sur mesure et un ensemble de compétences et de technologies à faible émission de carbone disponibles auprès d'un consortium d'entreprises sélectionnées. Ce consortium certifié ICE fera la promotion de l'offre auprès d'autres territoires isolés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la région de la Manche (initialement 5 territoires). Le modèle de partenariat ICE rassemble des chercheurs et des organismes d'accompagnement des PME et sera composé de membres français et britanniques en termes de compétences, de développement technologique et commercial.

L'implication des PME locales et européennes renforcera encore la compétitivité et la coopération transnationale.



RAPPORT ICE T3.3.1

Un système énergétique intelligent optimisé

Auteurs :

Xin Li ^a

Phedeas Stephanides ^a

Guillermo De Loureiro Pereira ^a

Alexis Ioannidis ^a

Arijit Bhattacharya ^a

Antonios Karatzas ^a

Dimitris Zissis ^a

Gwendal Vonk ^b

Peter Connor ^c

Konstantinos Chalvatzis^a

^a Norwich Business School, Université d'East Anglia, Norwich, NR4 7TJ, Royaume-Uni

^b Syndicat Départemental d'Énergie et d'Équipement du Finistère (SDEF), 9 All. Sully, 29000 Quimper, France

^c University of Exeter, Penryn Campus, Treliever Road, Penryn, Cornwall, TR10 9FE, Royaume-Uni

Auteur correspondant :

Professeur Konstantinos J. Chalvatzis

Norwich Business School, Université d'East Anglia, Norwich, NR4 7TJ, Royaume-Uni

Email : k.chalvatzis@uea.ac.uk

Tél. : +44 (0)1603 59 7241

Format de citation suggéré :

Li, X., Stephanides, P., Pereira, G. I., Ioannidis, A., Bhattacharya, A., Karatzas, A., Zissis, D., Vonk, G., Connor, P., Chalvatzis, K. 2021. Un système énergétique intelligent optimisé. (Rapport ICE T 3.3.1), Intelligent Community Energy. . <https://www.ice-interreg.eu/public-deliverables>



Table des matières

1	Introduction.....	7
2	Technologies d'application d'énergie à faible émission de carbone à l'UEA.....	8
2.1	Système solaire photovoltaïque	8
2.2	Centrales de cogénération et chaudières à gaz.....	10
2.3	Système de stockage thermique	13
2.4	Autres technologies à faible émission de carbone et mesures	14
2.5	Conclusions.....	17
2.6	Références.....	17
3	Optimisation des performances du système énergétique à faible émission de carbone de l'UEA 19	
3.1	Un système énergétique intégré à l'UEA	19
3.1.1	Optimisation des performances des technologies à faible émission de carbone existantes 19	
3.1.2	Engagement des utilisateurs.....	21
3.2	Projets futurs de construction d'un système énergétique à faible émission de carbone à l'UEA 24	
3.3	Conclusions.....	27
3.4	Références.....	28
4	Interventions mises en œuvre à l'UEA.....	29
4.1	Maîtrise de la demande en énergie.....	29
4.1.1	Définition de la Maîtrise de la demande en énergie.....	31
4.1.2	Types de Maîtrise de la demande en énergie	32
4.1.3	Applications de la MDE.....	33
4.2	Rénovations nécessaires pour un chauffage intelligent	35
4.2.1	Conception du système	35
4.2.2	Solution mise en œuvre.....	37
4.2.3	Intégration du système de chauffage intelligent dans les systèmes énergétiques existants et futurs à faible émission de carbone à l'UEA	39
4.2.4	Résultats de la mise en œuvre du système de chauffage intelligent	41
4.3	Réponse de fréquence	43
4.3.1	Réponse de fréquence - Description	43
4.3.2	Réponse de fréquence à l'UEA.....	44
4.4	Autres interventions mises en œuvre et envisagées à l'UEA	46
4.5	Conclusions.....	48
4.6	Références.....	49
5	Apprentissage mutuel entre l'UEA et Ouessant.....	51



5.1	Résultats transférables du projet d'Ouessant	51
5.2	Résultats transférables de l'UEA.....	53
5.3	Conclusions.....	54
5.4	Références.....	54
6	Conclusions.....	56
	Annexe I : Supports de l'exposition en français et en anglais.....	58



1 Introduction

L'Université d'East Anglia (UEA) a une longue histoire de travail dans la lutte contre le changement climatique. Du point de vue de la recherche universitaire, l'Unité de recherche climatique et le Centre Tyndall pour la recherche sur le changement climatique sont des centres de recherche de renommée mondiale en matière d'études sur le changement climatique. Ces unités de recherche contribuent à la compréhension du système climatique mondial et de ses implications pour la société depuis 1972. L'Unité de recherche sur le climat est réputée pour avoir construit un enregistrement mondial des températures de l'air en surface. En outre, les chercheurs du Tyndall Center pour la recherche sur le changement climatique ont apporté une contribution significative à l'élaboration des politiques climatiques au Royaume-Uni ainsi qu'aux rapports du GIEC. D'autre part, l'Université s'est engagée à mettre en place une transition énergétique à faible émission de carbone sur le campus. Par exemple, le bâtiment « Enterprise Center Building » est un exemple de solution de construction à faible émission de carbone, avec des matériaux naturels et recyclés provenant de la chaîne d'approvisionnement locale dans la mesure du possible. 30 % de sa consommation d'électricité est fournie par des panneaux solaires photovoltaïques. Le Centre a également pour objectif de soutenir fortement le développement d'entreprises de développement durable et à faible émission de carbone.

En 2021, le Vice-chancelier a annoncé que l'Université atteindra le niveau de zéro émission nette de carbone d'ici 2045. En utilisant une méthodologie « Communauté universitaire et Population locale »¹, le budget carbone restant pour l'UEA est calculé à 147 kT CO₂. Les quatre cinquièmes des émissions totales sont liées à la consommation d'énergie de ses bâtiments universitaires et dortoirs. Le reste provient des émissions liées au transport.

Depuis le début des années 2000, l'UEA a mis en place une série de mesures afin de réduire ses émissions de carbone. Le Livrable 3.3.1 vise à présenter les technologies à faible émission de carbone existantes et leur fonctionnement intégré sur le campus de l'UEA, ce qui peut apporter des enseignements sur la transition énergétique à Ouessant. Il couvre notamment la démonstration d'un système de chauffage intelligent qui a le potentiel de devenir une importante source de flexibilité de la demande à l'avenir.

Outre cette introduction, ce livrable comporte quatre sections principales :

- La Section 2 présente les technologies à faible émission de carbone adoptées à l'Université d'East Anglia, y compris le système de panneaux photovoltaïque, les centrales de cogénération (CHP), les chaudières à gaz écoénergétiques, le système de stockage de chaleur thermique et d'autres technologies intelligentes et à faible émission de carbone.
- La section 3 se concentre sur l'intégration de technologies à faibles émissions de carbone à l'UEA afin d'optimiser le fonctionnement du système et examine les possibles options technologiques pour l'approvisionnement énergétique futur de l'UEA.
- La section 4 se concentre sur la mise en œuvre de mesures à faible émission de carbone du côté demande à l'UEA. Deux technologies et services clés à faible émission de carbone sont introduits, notamment le système de chauffage intelligent et les services de contrôle de

¹ La méthodologie « Communauté universitaire et Population locale » calcule les émissions de carbone des organisations sur la base de la distribution proportionnelle de ses niveaux d'émission correspondant aux émissions liées à l'énergie d'une ville. Pour l'UEA, cela représente 4 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie à Norwich.



fréquence. Ces technologies et services sont considérés comme complémentaires à l'optimisation du système d'approvisionnement énergétique de l'UEA.

- La section 5 traite de l'opportunité potentielle d'apprentissage mutuel entre l'UEA et Ouessant.
- La section 6 est la conclusion du livrable.

2 Technologies d'application d'énergie à faible émission de carbone à l'UEA

Dans le cadre de ses stratégies existantes de développement à faible émission de carbone, l'Université a adopté une série de technologies à faible émission de carbone dans son approvisionnement énergétique, y compris l'installation d'un système photovoltaïque, la mise à niveau des centrales de cogénération (CHP), le remplacement de anciennes chaudières peu efficaces, l'adoption d'un système de stockage de chaleur thermique et d'autres technologies intelligentes et à faible émission de carbone telles que l'utilisation de la technologie ThermoDeck dans les bâtiments et l'installation d'un système de refroidissement urbain. Cette section présente chacune de ces technologies d'approche d'énergie à faible émission de carbone à l'UEA.

2.1 Système solaire photovoltaïque

Des panneaux solaires ont initialement été installés sur le bâtiment ZICER en 2002 avec une capacité totale de 34 kW (voir Figure 1). Le projet a démontré avec succès le potentiel de la construction d'un système photovoltaïque intégré sur le campus de l'UEA. Depuis lors, l'Université a progressivement étendu sa capacité solaire en installant de nouveaux panneaux solaires sur les bâtiments d'hébergement (notamment 20,7 kW au Chrome Court) ainsi que sur les bâtiments universitaires (notamment 19,8 kW au Julian Study Centre)(UEA 2014). Depuis 2013, tous les nouveaux bâtiments sont tenus d'installer des panneaux solaires sur les toits(UEA 2021a). Une liste de la capacité de l'installation solaire photovoltaïque sur le campus de l'UEA est disponible dans le Tableau 1.



Figure 1 Panneaux solaires installés dans le bâtiment du Zuckerman Institute for Connective Environmental Research (ZICER)



Malgré l'intérêt croissant pour les énergies renouvelables à l'UEA, le solaire photovoltaïque représente encore une petite part de la production totale d'électricité sur le campus. À la fin de 2020, la capacité solaire totale installée était de 279,7 kW avec une production totale d'électricité de 273 000 kWh. Cela représente environ 1 % de la consommation totale d'électricité de l'UEA. Le facteur de capacité moyen de l'électricité solaire photovoltaïque est de 9,8 %, ce qui est légèrement inférieur à celui de la moyenne nationale au Royaume-Uni.². Néanmoins, le développement du système solaire photovoltaïque à l'avenir sera essentiel pour permettre à l'UEA d'atteindre ses objectifs de neutralité carbone d'ici 2045. Une croissance potentielle de la capacité solaire photovoltaïque installée est probable à l'avenir.

Nom du bâtiment	Capacité installée (kW)
INTO	99,6
Enterprise Centre	48
Zicer	34
Hickling	21,7
Chrome Court	20,7
Julian	19,8
Barton	18,8
Bob Champion	17,8
Total	279,7

Tableau 1 Liste des systèmes solaires photovoltaïques installés dans les bâtiments de l'UEA

L'une des principales préoccupations liées au déploiement à grande échelle de systèmes solaires photovoltaïques est liée aux variations dans la production d'énergie solaire. La production d'énergie solaire se concentre sur une période relativement courte de la journée et est soumise au rayonnement solaire et à la couverture nuageuse. Il existe également d'importantes variations saisonnières dans la production d'énergie solaire en raison de journées plus longues et de niveaux d'éclairage plus intenses en été. La Figure 2 montre les variations saisonnières et diurnes des niveaux d'éclairage à l'UEA. Comparée aux technologies de production d'électricité conventionnelles, la production solaire est moins capable de répondre à elle seule à l'évolution de la demande. En tenant compte des variations quotidiennes et saisonnières de la charge, l'UEA a envisagé un certain nombre d'options à associer à la production solaire, notamment l'utilisation de systèmes de stockage d'électricité par batterie et de réponse à la demande. La variabilité solaire et la saisonnalité sont des défis connus pour tous les projets d'énergie solaire, en particulier dans la région FCE (un peu moins en France qu'au Royaume-Uni). Ils deviennent plus importants dans les zones isolées lorsque les réseaux existants faibles luttent pour compenser la variabilité solaire. Cependant, le faible coût du solaire photovoltaïque et le coût progressivement réduit des batteries feront des combinaisons plaques photovoltaïques et batteries une proposition viable.

² Selon Statista (2021), le facteur de capacité moyen du solaire photovoltaïque au Royaume-Uni est d'environ 11 % entre 2012 et 2019. Disponible sur : <<https://www.statista.com/statistics/555697/solar-electricity-load-factor-uk/>>



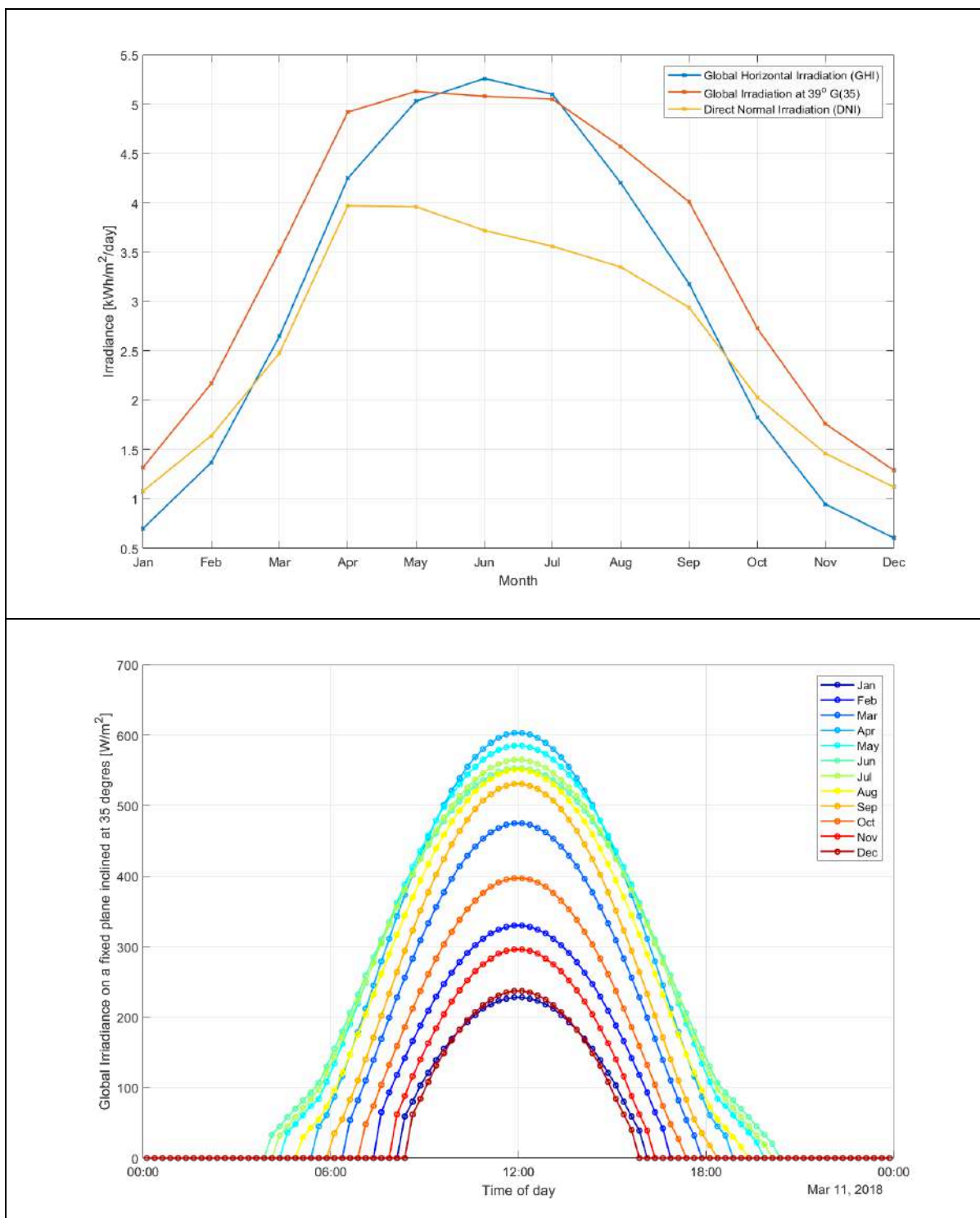


Figure 2 Variations saisonnières et quotidiennes des niveaux d'éclaircement

2.2 Centrales de cogénération et chaudières à gaz

Des centrales de cogénération ont été installées pour la première fois à l'UEA à la fin des années 1990. Entre 1995 et 2000, trois unités de cogénération ont été déployées, chacune d'une puissance électrique nominale de 1 MW. Depuis lors, les unités de cogénération sont la principale source d'énergie du campus. En moyenne, environ 70 à 80 % de l'énergie consommée est produite par la centrale de



cogénération (UEA 2014). Trois types de services énergétiques sont fournis par les unités de cogénération. Premièrement, plus de 70 % de la consommation d'électricité repose sur la production des unités de cogénération ; deuxièmement, la majorité des bâtiments du campus dépendent des unités de cogénération pour les services de chauffage via le réseau de chauffage urbain ; troisièmement, elles fournissent des services de refroidissement par le biais du système de refroidissement urbain, qui a été adopté pour la première fois en 2006 (UEA 2021b).



Figure 3 Nouvelles unités de cogénération installées à l'UEA

Deux nouvelles unités de cogénération ont été installées en 2017 pour remplacer les anciens modèles construits dans les années 1990 (Voir Figure 3). Les unités de cogénération mises à niveau ont une durée de vie proposée de 15 ans, avec une capacité totale de production d'électricité de 4 MW. Avec un niveau d'efficacité énergétique plus élevé, les unités de cogénération améliorées devaient aider l'Université à réduire les émissions de carbone de 35 % avant 2020, par rapport aux niveaux de 1990.

Le déploiement d'unités de cogénération apporte de multiples avantages à l'UEA :

- Il réduit la dépendance envers le réseau en produisant de l'électricité et de la chaleur sur place, améliorant ainsi la sécurité d'approvisionnement du réseau local.
- Il permet de réaliser d'importantes économies sur les factures d'énergie. Par exemple, les unités de cogénération améliorées se traduisent par une économie annuelle de 800 000 £ grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cela représente une réduction significative des coûts étant donné le coût annuel des services publics s'élevant à plus de 4 M£ entre 2014 et 2015 (UEA 2016). La mise à niveau fait partie d'un investissement de 5 M£ entre 2015 et 2020 pour

améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de carbone sur le campus de l'UEA³. Grâce au nouvel investissement, le coût total de l'énergie est désormais d'environ 3 M£ par an (UEA 2021a). La Figure 4 présente les coûts énergétiques annuels de l'UEA.

- Elle réduit l'empreinte carbone de la consommation d'énergie de 20 % ou de 5 000 tonnes équivalent CO₂ chaque année, par rapport à l'utilisation de chaudières traditionnelles pour le chauffage et l'électricité importée du réseau.

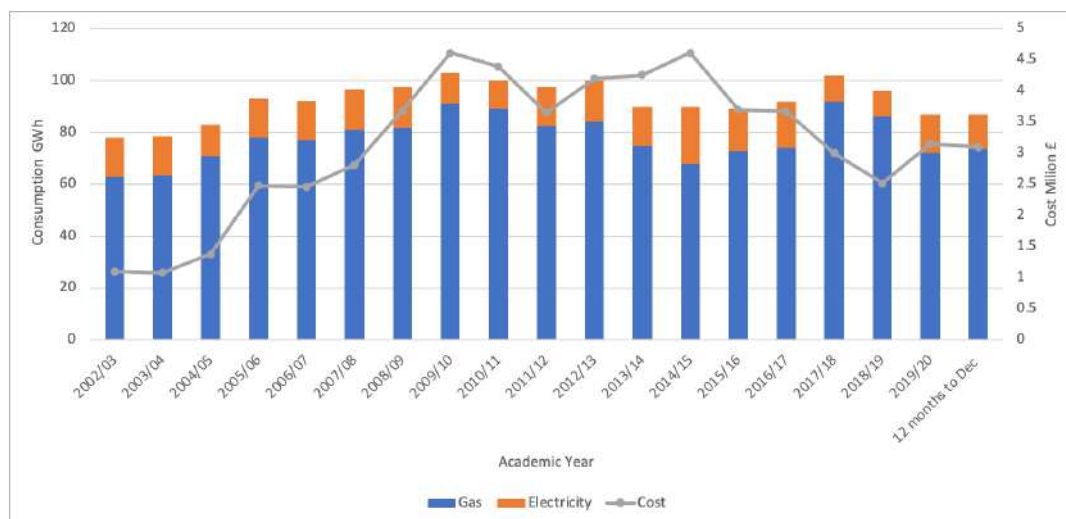


Figure 4 Importations de gaz et d'électricité et coûts associés

Source : (UEA 2021d)

Outre l'installation d'unités de cogénération, l'UEA a également mis en œuvre d'autres mesures pour améliorer ses performances énergétiques du côté de l'approvisionnement. Par exemple, au printemps 2015, l'UEA a remplacé ses chaudières datant de 1964 par trois nouvelles chaudières. Avec une durée de vie de 15 ans, les 6 MW de chaque nouvelle chaudière servent d'appui aux unités de cogénération pour les services de chauffage et peuvent être bénéfiques pour gérer la croissance du parc. Par rapport aux anciennes chaudières, les nouvelles chaudières ont une efficacité énergétique plus élevée (92 % contre 75 %), ce qui peut entraîner des coûts inférieurs (économies de plus de 50 000 par an) et des émissions plus faibles (des économies de plus de 300 tonnes de CO₂ par an).

Malgré l'efficacité énergétique plus élevée, les unités de cogénération et les chaudières améliorées reposent sur la combustion de gaz. Cela représente un défi important pour atteindre l'objectif de zéro émission nette de carbone puisque la combustion du gaz naturel entraîne des émissions de CO₂. Des technologies alternatives ont été envisagées à l'UEA. Par exemple, une usine de gazéification de biomasse a été envisagée au début des années 2010. Cependant, le projet a été abandonné en raison de problèmes techniques. Au lieu de cela, une autre unité de cogénération de 1,7 MW a été installée, qui est maintenant utilisée comme unité de secours pour les principales unités de cogénération. Par conséquent, la capacité totale de cogénération à l'UEA est de 5,7 MW. Du fait que l'UEA s'est fixé pour objectif de devenir neutre en carbone d'ici 2045, il est anticipé que les unités de cogénération seront progressivement supprimées et remplacées par une source de chauffage et d'électricité décarbonisée

³ D'autres mesures comprennent l'installation d'un système de stockage thermique et l'adoption d'un éclairage à DEL, entre autres.



(UEA 2021d). Bien que l'électricité puisse être en partie obtenue directement par le réseau électrique, le chauffage pourrait devoir également être électrifié grâce à l'utilisation de technologie de pompe à chaleur. En conséquence, il y aura une plus grande dépendance du chauffage et de l'électricité sur le réseau électrique. Le réseau électrique en France et au Royaume-Uni est généralement considéré comme ayant des émissions de carbone relativement faibles, et ce en raison des investissements nucléaires et de l'éolien offshore, respectivement. Lorsque disponible (ce qui n'est pas toujours le cas pour les territoires éloignés et les îles), l'électricité du réseau (pour l'électricité et le chauffage) offrira une proposition de plus en plus attrayante.

En plus de ce qui précède, il existe également quelques chaudières installées dans des bâtiments qui ne sont pas reliés au réseau de chauffage. Cependant, 95 % du gaz a été consommé dans les principales unités de consommation de gaz (centrales de cogénération et chaudières principales), tandis que les 5 % restants ont été utilisés par les chaudières locales. Hormis la production nationale, environ 30 % de l'approvisionnement en électricité est importé du réseau.

2.3 Système de stockage thermique

En 2016, l'UEA a installé deux grands réservoirs, chacun d'une capacité de 100 m³ d'eau chaude (voir Figure 5). L'installation permet le fonctionnement optimal des unités de cogénération et de la chaudière. Par exemple, les trois chaudières à gaz sont à leur maximum d'efficacité lorsqu'elles fonctionnent à 65 % de leur puissance nominale. Dans le cas où la demande de chauffage est supérieure ou inférieure aux performances maximales des chaudières, le système de stockage thermique peut soit stocker la production de chaleur excessive, soit évacuer la chaleur vers le réseau de chauffage urbain. Tout comme les chaudières à gaz, l'utilisation de l'unité de cogénération peut produire une chaleur excessive. Lorsque la demande d'électricité augmente, les unités de cogénération doivent augmenter leur production d'électricité pour répondre à l'augmentation de la demande. La production de chaleur coïncide avec la production d'électricité pour la centrale de cogénération. Cependant, la demande de chaleur peut ne pas atteindre son maximum et un excès de chaleur est alors produit. Si aucun système de stockage thermique n'est en place, la production de chaleur excessive est déversée, ce qui entraîne une baisse de l'efficacité énergétique. Par conséquent, l'installation d'un système de stockage thermique peut réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ associées.





Figure 5 Système de stockage thermique à l'UEA

Les économies estimées réalisées grâce au déploiement du système de stockage thermique étaient de plus de 200 000 £ par an⁴. Avec un coût total de 600 000 £, le projet a une période de d'amortissement de moins de trois ans. Les bénéfices environnementaux sont également importants. Par exemple, les économies totales de CO₂ devraient atteindre 1 270 tonnes de CO₂ par an⁵ (UEA 2021c). Plus important encore, et pour l'avenir, le système de stockage de chaleur est capable de fonctionner en combinaison avec des systèmes de chauffage électrifiés à faible émission de carbone tels que des pompes à chaleur et des systèmes de contrôle de la température du côté de la demande pour ajuster les flux de chaleur.

2.4 Autres technologies à faible émission de carbone et mesures

À l'UEA, 99 % des émissions directes de carbone sont liées à la consommation d'énergie dans les bâtiments. Entre 1990 et 2017, la superficie totale des bâtiments du campus a plus que doublé. Du fait que l'Université envisage d'étendre sa surface à l'avenir, il est nécessaire de découpler la consommation d'énergie de l'augmentation de la surface. Par conséquent, plusieurs nouvelles technologies ont été adoptées pour contrôler les impacts environnementaux des nouveaux bâtiments ainsi que pour gérer efficacement la consommation d'énergie des bâtiments existants à l'UEA.

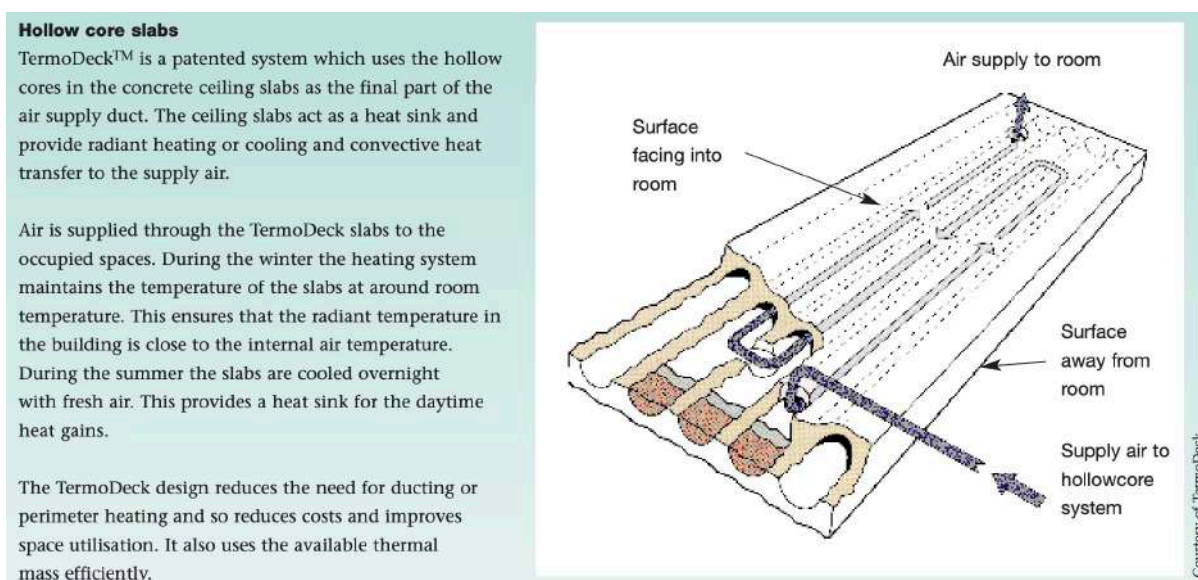
Pour améliorer les performances énergétiques et environnementales, la conception des nouveaux bâtiments du campus de l'UEA est dominée par deux facteurs principaux, à savoir la minimisation des consommations énergétiques de chauffage et de climatisation et une utilisation optimisée de la lumière

⁴ Cela comprend des économies de 149 000 £ pour améliorer l'efficacité énergétique des trois chaudières et 60 000 £ d'économies pour stocker la chaleur excessive des unités de cogénération. Cependant, les économies réelles sont soumises à l'évolution des prix du gaz.

⁵ Cela comprend 735 tonnes d'économies de CO₂ grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique des trois chaudières et 535 tonnes de CO₂ grâce aux économies liées à la cogénération.



du jour. L'une des nouvelles technologies adoptées à l'UEA s'appelle TermoDeck, qui aide à réduire la consommation d'énergie nécessaire au chauffage et au refroidissement. TermoDeck utilise au mieux la masse thermique en hiver, qui fournit une inertie contre les fluctuations de température en stockant la chaleur pendant la journée. Étant donné que le chauffage représente plus de la moitié de la consommation totale d'énergie dans les bâtiments conventionnels, TermoDeck réduit considérablement la consommation d'énergie en matière de chauffage. Par exemple, l'adoption de TermoDeck réduit efficacement de trois quarts la consommation d'énergie pour le chauffage dans le bâtiment Elizabeth Fry, par rapport à d'autres bâtiments sans cette technologie. De plus, les coûts d'entretien sont 50 % inférieurs à ceux des bâtiments conventionnels (Newton 2005). TermoDeck a depuis également été utilisé dans d'autres nouvelles constructions à l'UEA (comme le bâtiment du Zuckerman Institute for Connective Environmental Research, le Thomas Paine Study Centre et le Julian Study Centre). Les caractéristiques techniques de TermoDeck sont présentées dans l'encadré 1 ci-dessous.



Encadré 1 : Caractéristiques techniques de la technologie TermoDeck

Source : (TermoDeck 1998)

Outre TermoDeck, une gamme de technologies a été adoptée dans le cadre du projet REFIT de l'UEA, avec un investissement total de 1 million £ dans les mesures de conservation de l'énergie. La première phase du projet s'est déroulée entre 2017 et 2018, ciblant 6 bâtiments universitaires et 22 quartiers de résidences universitaires (Vital Energi 2019). Les mesures mises en œuvre comprenaient :

- L'installation d'un système de gestion technique de bâtiment (GTB)⁶ pour contrôler et surveiller la consommation d'énergie dans les bâtiments.
- Une mise à jour des unités de traitement d'air et des ventilateurs de condenseur de refroidisseur pour réduire la consommation d'énergie.

⁶ La GTB fait référence à la technologie et aux systèmes de contrôle qui permettent une surveillance granulaire de la consommation d'énergie dans différents bâtiments. Cela permet une utilisation optimisée de l'énergie, en particulier à des fins de chauffage et de refroidissement.



- Une mise à niveau du système d'éclairage avec des ampoules à DEL et des systèmes de contrôle intelligents⁷.

La mise en œuvre de ces mesures d'économie d'énergie a permis de réaliser des économies de coûts, d'énergie et d'émissions de CO₂. Le Tableau 2 ci-dessous présente les coûts totaux du projet et les économies garanties du projet REFIT :

Energy Conservation Measure: Price			Guaranteed Savings										
Ref. No.	ECM	Total Project Cost (inc VAT)	Electricity		Heat/Gas		ANNUAL TOTAL SAVINGS						Payback
			Annual Energy Saving		Annual Energy Savings		Total Annual Energy Saving		Total Annual CO ₂ Savings		Total Annual Energy Cost Saving		
		£	kWh	%	kWh	%	kWh	%	T CO ₂ e	%	£	%	
ECM 1	BMS Optimisation	£167,335	72,224	0.4 %	1,136,175	5.4 %	1,208,399	3.2 %	248.0	2.9 %	£43,580	1.7 %	3.8
ECM 2	Ventilation & Fans	£327,101	580,693	3.4 %	-	0.0 %	580,693	1.5 %	146.7	1.7 %	£68,357	2.7 %	4.8
ECM 3	Lighting: LIB LEDs	£550,510	587,128	3.4 %	-	0.0 %	587,128	1.5 %	148.3	1.7 %	£72,542	2.9 %	7.6
Totals: ECMs		£1,095,453	1,240,045	7.3 %	1,136,175	5.4 %	2,376,220	6.2 %	543.0	6.3 %	£184,479	7.4 %	5.9

Table 2 Coûts et économies du projet REFIT

Source : (UEA 2017)

Avec toutes les mesures mises en œuvre, les émissions de carbone par mètre carré d'espace ont continué à être réduites parallèlement à l'augmentation des surfaces au sol. La Figure 6 montre que l'intensité carbone a été réduite de 49 % par rapport aux niveaux de 1990.

⁷ Il est également anticipé que moins d'entretien sera nécessaire. Par exemple, l'application d'éclairage à DEL peut conduire à des changements d'ampoules moins fréquents étant donné la durée de vie prolongée des ampoules à DEL par rapport aux ampoules fluorescentes.



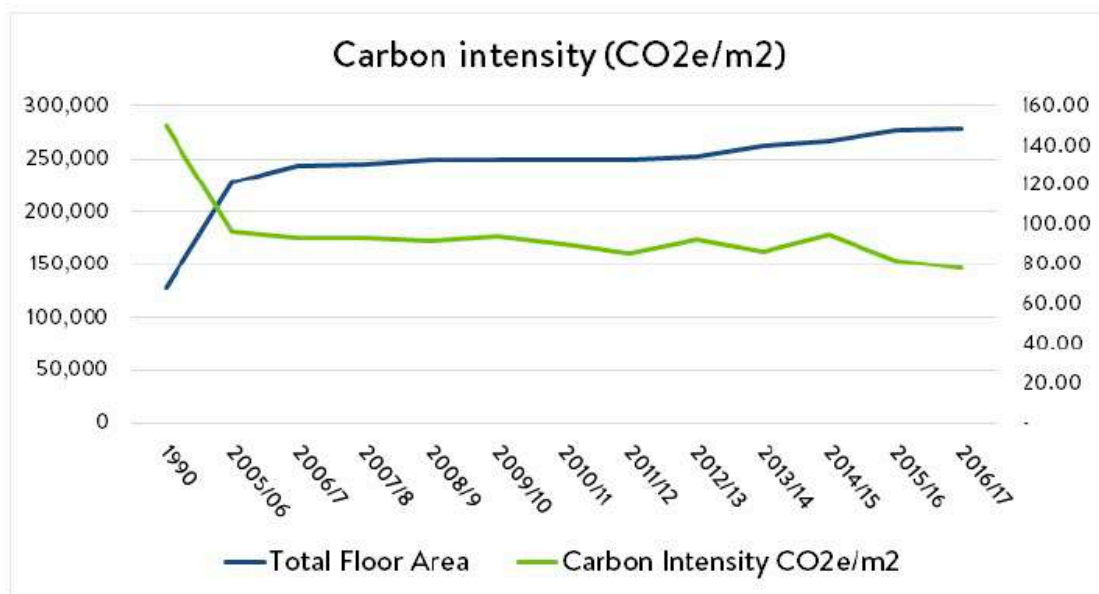


Figure 6 Évolution de la surface au sol totale et de l'intensité carbone

Source : (UEA 2017) page 12

2.5 Conclusions

L'UEA a, ces dernières années, adopté un certain nombre de technologies énergétiques à faible émission de carbone en vue d'améliorer ses performances environnementales et énergétiques. Du côté de l'approvisionnement, l'UEA a investi dans des systèmes solaires photovoltaïques, installé et modernisé des unités de cogénération au gaz, modernisé trois chaudières à gaz et installé un système de stockage thermique. Les applications de technologies énergétiques à faible émission de carbone ont efficacement permis de réduire les émissions de CO₂ sur le campus de l'UEA. De plus, cela a permis de réaliser des économies sur les coûts énergétiques grâce à des améliorations en matière d'efficacité énergétique. Du côté de la demande en énergie, l'UEA a adopté de nouvelles technologies pour réduire la consommation d'énergie dans ses bâtiments. Par exemple, l'adoption de la technologie TermoDeck réduit considérablement la consommation d'énergie pour le chauffage ; l'installation d'une GTB permet un contrôle plus granulaire de la consommation d'énergie dans les différents bâtiments ; la mise à niveau de l'éclairage à DEL permet des économies en consommation d'énergie pour l'éclairage et de réduire les coûts de maintenance.

2.6 Références

- Newton, M. (2005). "Client Testimonials: Elizabeth Fry Building, University of East Anglia UK." Retrieved 18 August, 2021, from <https://www.termodeck.com/satisfaction.html>.
- TermoDeck. (1998). "The Elizabeth Fry Building, University of East Anglia." New Practice Final Report 106 Retrieved 18 August, 2021, from https://www.termodeck.com/Filer/pdf/BRE_EFRY_REPORT.pdf.
- UEA. (2014). "Environmental Report." Sustainable Ways Retrieved 18 August, 2021, from https://sites.uea.ac.uk/documents/3154295/9533899/UEA+Environmental+Report+2014_upload+v1.pdf.
- UEA (2016). Target 2020. Sustainable Ways - Energy and Carbon, University of East Anglia.



UEA (2017). Annual Environmental Sustainability Report 2017. Sustainable Ways, University of East Anglia.

UEA. (2021a). "Energy Efficiency and Carbon Reduction." Retrieved 18 August, 2021, from <https://www.uea.ac.uk/about/university-information/sustainability/sustainable-campus/energy-efficiency-and-carbon-reduction>.

UEA. (2021b). "Projects: District Cooling System." Retrieved 18 August, 2021, from https://www.uea.ac.uk/web/about/university-information/sustainability/projects/-/asset_publisher/PeaY8phFOiQa/content/2005-2010-district-cooling-and-thomas-paine-study-centre?_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa_redirect=https%3A%2F%2Fwww.uea.ac.uk%3A443%2Fweb%2Fabout%2Funiversity-information%2Fsustainability%2Fprojects%3Fp_p_id%3Dcom_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa_cur%3D2%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa_delta%3D6%26p_r_p_resetCur%3Dfalse%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa_assetEntryId%3D3291846#TitleBar.

UEA. (2021c). "Projects: Thermal Stores." Retrieved 18 August, 2021, from https://www.uea.ac.uk/web/about/university-information/sustainability/projects/-/asset_publisher/PeaY8phFOiQa/content/thermal-stores?_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa_redirect=https%3A%2F%2Fwww.uea.ac.uk%3A443%2Fweb%2Fabout%2Funiversity-information%2Fsustainability%2Fprojects%3Fp_p_id%3Dcom_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa_cur%3D4%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa_delta%3D6%26p_r_p_resetCur%3Dfalse%26_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_PeaY8phFOiQa_assetEntryId%3D3246862#TitleBar.

UEA (2021d). Sustainability Board Meeting Minutes April 2021, University of East Anglia.

Vital Energi. (2019). "REFIT project: University of East Anglia." Retrieved 18 August, 2021, from <https://www.vitalenergi.co.uk/our-work/university-of-east-anglia/>.



3 Optimisation des performances du système énergétique à faible émission de carbone de l'UEA

Cette section présente l'optimisation des performances des technologies énergétiques à faible émission de carbone de l'UEA. Grâce à une meilleure coordination entre les différentes technologies, un système énergétique intégré peut réduire efficacement la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ associées, améliorer la sécurité d'approvisionnement énergétique du réseau local et réduire les coûts. À l'UEA, l'exploitation de la centrale de cogénération réduit la dépendance à l'égard de l'électricité importée du réseau, garantissant ainsi la sécurité de l'approvisionnement en électricité sur le campus. L'efficacité de fonctionnement de la cogénération est grandement améliorée lorsqu'elle est combinée avec le système de stockage thermique. La production excessive de chaleur de la cogénération peut être stockée et distribuée plus efficacement grâce à son système de chauffage et de refroidissement urbain. Une autre contribution importante du système de stockage thermique est de maximiser l'efficacité de fonctionnement des chaudières à gaz, qui peuvent maintenir leurs niveaux de performance optimaux même pendant une période de faible demande. En outre, l'UEA a également adopté d'autres technologies/mesures qui réduisent sa consommation d'énergie grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique, telles que l'utilisation de la technologie TermoDeck dans les bâtiments.

Cette section illustre d'abord l'intégration de différentes technologies à l'UEA afin d'optimiser le fonctionnement du système dans la Section 3.1. Ensuite, elle passe en revue les options technologiques pour l'approvisionnement énergétique futur de l'UEA dans la Section 3.2.

3.1 Un système énergétique intégré à l'UEA

3.1.1 Optimisation des performances des technologies à faible émission de carbone existantes

La performance optimale du système énergétique de l'UEA dépend de plusieurs facteurs clés. Tout d'abord, l'adoption de la cogénération réduit les émissions liées à l'électricité importée et améliore l'efficacité énergétique globale de la fourniture d'énergie. Les unités de cogénération produisent de l'électricité via des moteurs à combustion interne, qui produisent en même temps une quantité importante de chaleur. Pour une unité à gaz conventionnelle, la production de chaleur excédentaire est déversée via le système de refroidissement (généralement dans l'air), ce qui entraîne des pertes de conversion d'énergie. À titre d'exemple, l'efficacité thermique moyenne des stations de turbines à gaz à cycle combiné est d'environ 48 % au Royaume-Uni (Statista 2021), contre 80 % pour une centrale de cogénération lorsque la chaleur est utilisée. Sur le campus de l'UEA, tant les bâtiments universitaires que les bâtiments résidentiels nécessitent un approvisionnement en chaleur. Grâce à la construction d'un réseau d'approvisionnement en chaleur, une centrale de cogénération est la mieux adaptée pour fournir à la fois de la chaleur et de l'électricité sur le campus, car elle permet une meilleure efficacité énergétique par rapport à la desserte distincte des deux types de services énergétiques.

Outre la demande de chauffage, il existe également une demande de refroidissement à la fois à des fins de recherche académique (comme la réfrigération des matériaux sensibles) et de confort en été. L'UEA dispose également d'un système de refroidissement urbain qui utilise la chaleur résiduelle des centrales de cogénération et produit de l'eau froide via une unité de refroidissement à absorption. Le nouveau système a remplacé l'ancienne réfrigération à compression électrique et fournit un refroidissement aux équipements de laboratoire et aux zones sujettes à la surchauffe. L'adoption d'un système de refroidissement urbain présente au moins deux avantages. Premièrement, cela permet de réduire la



consommation d'électricité à des fins de refroidissement, ce qui entraîne donc des économies de coûts et d'émissions sur le campus. Deuxièmement, cela réduit le besoin de réfrigérants, ce qui réduit les émissions de nombreux gaz qui ont un potentiel de réchauffement global (PRG) beaucoup plus élevé que le CO₂. La figure 7 ci-dessous montre la perte totale de réfrigérant, basée sur un calcul de l'équivalent CO₂ de plusieurs gaz à effet de serre.

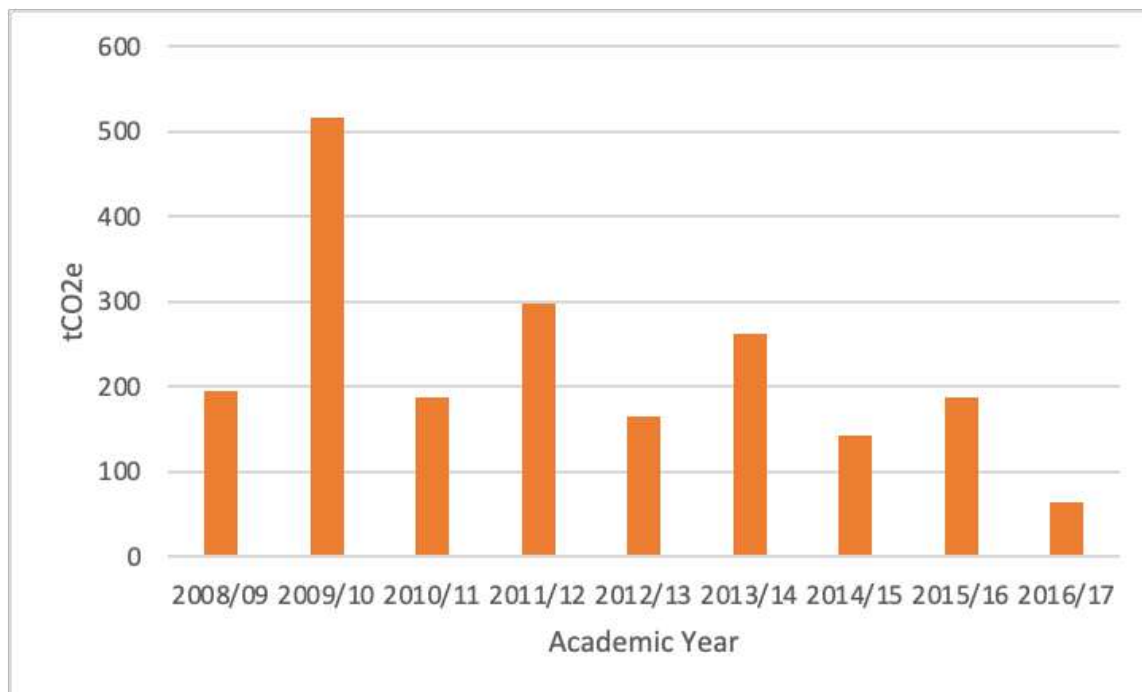


Figure 7 Perte totale de réfrigérant (tCO₂e)

Source : (UEA 2017)

Comme mentionné ci-dessus, il existe des variations importantes dans la demande de chaleur et d'électricité, qui n'atteignent généralement pas un pic en même temps. Lors d'événements où la demande d'électricité est élevée et la demande de chaleur est faible, la production de chaleur excessive de la centrale de cogénération n'est pas nécessaire. Sans une installation de stockage de chaleur appropriée, la chaleur sera transférée à l'environnement, entraînant une perte d'efficacité énergétique et des émissions inutiles. Pour mieux utiliser les sources d'énergie, un système de stockage thermique est installé sur le campus de l'UEA pour stocker la production de chaleur excessive. Il peut libérer la chaleur en cas d'augmentation de la demande de chaleur, sans besoin d'actionner les centrales de cogénération. Par conséquent, le système de stockage thermique réduit la consommation d'énergie en stockant la chaleur pour une utilisation ultérieure. En outre, le système de stockage thermique est utilisé pour stocker la chaleur des chaudières à gaz, ce qui permet aux chaudières de fonctionner à leurs niveaux de fonctionnement optimaux (à environ 60 à 65 % de la capacité nominale). Tout comme le fonctionnement de la centrale de cogénération, cela signifie que lorsque la demande de chaleur est à son niveau bas, les chaudières à gaz peuvent toujours fonctionner à leur capacité optimale. La production de chaleur supplémentaire est stockée pour une utilisation ultérieure. Par conséquent, le système de stockage thermique permet une meilleure coordination entre les installations d'approvisionnement en énergie sur le campus de l'UEA.

Un approvisionnement sûr en électricité et en chaleur exige que la demande soit à tout moment satisfaite par l'offre. Le système de stockage thermique permet le stockage de la chaleur lorsque la production est



supérieure à la demande. L'une des autres options consiste à faire participer la demande en énergie à l'optimisation des performances des technologies à faibles émissions de carbone. À l'UEA, la demande en électricité et en chaleur présente des variations journalières et saisonnières importantes. Par exemple, il existe de grandes différences dans la demande de chauffage entre l'été et l'hiver. Elle atteint généralement le pic de consommation en hiver, qui représente 70 % de la demande annuelle. Une forte baisse de la demande se produit généralement en mai, au début de la saison des vacances d'été, avant d'atteindre les niveaux les plus bas en juillet et août. C'est le résultat d'une combinaison de facteurs tels qu'un nombre réduit de personnes sur le campus et une demande de chauffage réduite en raison de températures extérieures plus chaudes. Bien que le système de stockage thermique puisse faire face aux variations à court terme de la demande, il ne peut pas fournir sur le long terme, comme lors des variations saisonnières. En revanche, la demande d'électricité ne présente pas de variations saisonnières significatives. En moyenne, 52 % de l'électricité est consommée en hiver, tandis que 48 % est consommée en été. Au lieu de cela, la demande d'électricité varie à différents moments de la journée. Par exemple, elle atteint généralement le pic de consommation en fin d'après-midi entre 16h et 20h, de façon similaire à la période de pic de demande au niveau national. Il existe également des différences significatives dans la demande d'électricité entre la semaine et le weekend. En moyenne, la demande est inférieure de 20 % le weekend pendant la journée.

Pour faire face aux variations à court et à long terme de la demande d'électricité et de chaleur, l'Université a intégré plusieurs technologies différentes pour gérer la consommation d'énergie du côté de la demande en énergie. La première série de mesures concerne l'amélioration de l'efficacité énergétique, réduisant ainsi la demande globale d'énergie sur le campus. Par exemple, l'adoption de la technologie TermoDeck, l'utilisation d'une GTB et la mise à niveau de l'éclairage à DEL contribuent toutes à l'amélioration globale de l'efficacité énergétique. Ces mesures permettent de découpler la consommation d'énergie de l'augmentation de la surface au sol et de favoriser une meilleure utilisation de l'énergie dans les bâtiments. En plus des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique, l'UEA est également avancée dans le domaine plus large de la réponse à la demande avec une expérience significative des applications de réponse de fréquence sur le campus⁸. Ces systèmes hautement automatisés permettent d'identifier rapidement les opportunités de réduction de la consommation d'énergie sur le campus lorsqu'il est nécessaire d'équilibrer l'offre et la demande d'énergie. Des systèmes moins automatisés sont tout aussi importants car ils peuvent être appliqués plus largement, mais nécessitent de meilleurs flux d'informations et une action active de la part des utilisateurs d'énergie du campus, les étudiants et les employés.

3.1.2 Engagement des utilisateurs

La majeure partie de l'attention des options technologiques décrites ci-dessus appartient à la catégorie plus large des solutions descendantes. Il est caractéristique de ces options qu'elles soient imposées par la planification centrale au sein de l'organisation et sont très courantes dans presque toutes les tentatives de transition énergétique vers une solution à faible émission de carbone. Dans de telles approches, la connexion entre les systèmes énergétiques et leurs utilisateurs peut être un atout plus important puisque l'infrastructure est plus importante. De plus, les conséquences de l'indisponibilité de l'énergie se font davantage sentir car, dans les systèmes isolés, il y a un manque d'alternatives. Par conséquent, cela soulève l'argument en faveur de l'innovation qui permet un paradigme différent à l'approche

⁸ La réponse de fréquence est présentée dans la Section 3.



descendante, à savoir une approche ascendante. Il est clair que la réorganisation d'un système énergétique ascendant complet sur un campus représente un coût important et doit être planifiée de manière appropriée, pour permettre aux systèmes existants d'atteindre la fin de leur durée de vie technique et financière. Il existe cependant encore un espace pour des innovations, car même si elles n'offrent pas une solution ascendante complète, elles peuvent au moins contribuer à rééquilibrer l'ensemble du système.

L'UEA a pris l'engagement d'améliorer ses références en matière de développement durable en impliquant son personnel et ses étudiants. Plusieurs programmes ont été mis en œuvre, notamment le programme Green Impact, Sustainable Societies et Staff Champions. À titre d'exemple, le programme Green Impact invite des équipes de tous les départements à participer et à contribuer au programme avec pour objectif principal d'accroître leur sensibilisation à l'environnement et d'améliorer les performances énergétiques (UEA 2021b). Le programme vise à encourager les changements de comportement du personnel et des étudiants, pour conduire à une consommation plus durable des ressources à l'UEA. Une approche inclusive est adoptée car toute personne intéressée par le programme peut y participer. Les principales actions utilisées par les équipes participantes comprennent les fermetures de vacances et les événements de la journée de sensibilisation. L'équipe de développement durable d'Estates fournit également un soutien aux équipes en proposant des suggestions et en donnant des commentaires sur les activités sélectionnées. Des prix sont décernés chaque année aux équipes et aux personnes ayant obtenu les meilleures réalisations en termes de conception de programmes, de mise en œuvre d'actions et de résultats finaux (par exemple, économies d'énergie ou réduction des émissions de carbone). Le programme Green Impact a grandement amélioré la conscience environnementale du personnel et des étudiants en général, mais aussi la compréhension de la transition vers des solutions à faible émission de carbone en particulier. Par exemple, dans le programme Green Impact 2017-18, un total de plus de 26 000 kilogrammes de CO₂ et 7 000 £ ont été économisés. 1 455 employés ont participé à 644 actions environnementales. 16 équipes avec 78 membres ont participé au programme. 54 étudiants ont été formés comme auditeurs et assistants de projet (UEA 2017).

Alors que l'UEA a fait plusieurs tentatives pour engager sa communauté dans l'action pour une transition énergétique à faible émission de carbone, cela n'a généralement pas inclus la responsabilisation des utilisateurs du campus à devenir responsables de leur propre consommation d'énergie. C'est un aspect que le projet ICE a d'abord tenté et qui est examiné plus en détail dans la Section 2. De plus, l'engagement des consommateurs peut se produire de différentes façons à différents endroits. Comme mentionné dans les sous-sections précédentes, l'UEA a activement collaboré avec le personnel et les étudiants par divers moyens afin de favoriser une meilleure communication sur les questions liées à la transition énergétique à l'UEA. Outre les mesures introduites, l'un des autres moyens d'offrir un bon canal de communication est de proposer une exposition.

Dans le projet ICE, l'équipe du SDEF a préparé une exposition qui montre la transition énergétique en général et plusieurs thématiques liées à la transition énergétique en particulier. Le concept de transition énergétique est introduit au début de l'exposition, avec une concentration particulière sur les changements de comportements individuels. Elle aborde le rôle des citoyens dans la transition énergétique, et comment ils peuvent contribuer à cette transition. Des questions sont incluses pour stimuler la réflexion sur les changements de comportement, par exemple, comment pouvons-nous consommer mieux et consommer moins à l'avenir ? Ensuite, l'exposition aborde trois thèmes différents, dont la mobilité durable, l'urbanisme durable et les systèmes énergétiques optimisés. Dans chaque thème, des exemples sont fournis sur la manière dont les citoyens peuvent participer et contribuer à la transition énergétique. À titre d'exemple, pour la mobilité durable, des idées sur le co-voiturage,



L'utilisation de la mobilité douce (par exemple le vélo et la marche) et l'utilisation des transports publics sont introduites. Ces mesures peuvent être utiles pour réduire les émissions associées dans le secteur des transports ; secteur qui a été largement tributaire des combustibles fossiles. L'exposition présente l'urbanisme et les concepts et approches associés pour parvenir à un urbanisme durable, y compris le concept de régulation thermique, l'idée de haies, ainsi que d'autres approches novatrices pour mieux gérer la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels. Pour le système énergétique optimisé, plusieurs nouveaux modèles/technologies énergétiques sont inclus, tels que la digestion anaérobie, le système de réseau intelligent et des technologies marines, entre autres. Les trois thèmes sont liés, ce qui offre une nouvelle approche pour simuler des réflexions sur des questions spécifiques ainsi que sur la transition énergétique en général.

Tout au long de l'exposition, des informations pertinentes sur la transition énergétique peuvent être diffusées via des interactions avec les participants. Par exemple, les participants peuvent poser des questions sur des sujets qui les intéressent et répondre à des questions pour refléter leurs idées sur la manière de réaliser la transition.

Le contenu de l'exposition a été traduit en anglais afin de permettre sa diffusion dans divers endroits au Royaume-Uni. L'Annexe I fournit plus de détails sur l'exposition en français et en anglais. Malheureusement, en raison des restrictions liées à la COVID-19, l'exposition n'a eu lieu qu'en France. La Figure 8 montre la préparation de l'exposition sur la transition énergétique. L'exposition a duré deux semaines. L'exposition au Royaume-Uni n'a pas été possible en raison de problèmes en matière de santé et de sécurité. Néanmoins, les affiches préparées et les idées derrière l'exposition peuvent être utilisées à l'avenir, le cas échéant.





Figure 8 Préparation de l'exposition sur la transition énergétique

3.2 Projets futurs de construction d'un système énergétique à faible émission de carbone à l'UEA

Le travail de l'UEA pour la réduction du changement climatique peut être illustré par ses engagements à réduire les émissions de GES à différentes périodes. Par exemple, dans un engagement antérieur, l'Université visait à réduire les émissions de carbone de 80 % d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990 (UEA 2016). Parallèlement à l'objectif de réduction des émissions à long terme, elle avait également développé une série d'activités et de programmes pour réduire progressivement les émissions de carbone à court terme. Par exemple, en 2015, l'équipe de Développement durable a annoncé la mise en œuvre du Programme de réduction de l'énergie et du carbone (ECRP ou Energy and Carbon Reduction Programme en anglais). Le programme a défini une série d'objectifs et d'actions pour parvenir à un système énergétique à faible émission de carbone sur le campus. La première phase de l'ECRP a été mise en œuvre entre 2015 et 2020. Deux objectifs principaux ont été fixés, à savoir :

- Réduire les émissions de carbone (Champ d'application 1 et Champ d'application 2 des émissions)⁹ de 35 % d'ici 2020, par rapport aux niveaux de 1990.
- Réduire la consommation d'énergie de 25 % d'ici 2020¹⁰, sur la base des niveaux de 2013-14.

Malgré les efforts croissants pour réduire les émissions de GES, des défis subsistent avec l'expansion continue de la surface au sol de l'UEA, qui entraîne une demande croissante d'énergie sur le campus. En avril 2021, l'Université n'avait pas atteint son objectif d'émissions de carbone à court terme pour 2020 de l'ECRP ; et n'affichait des réductions que de 18 % par rapport aux niveaux de 1990 (contre un

⁹ Le Champ d'application 1 des émissions comprend les émissions directes provenant de sources détenues et contrôlées. Le Champ d'application 2 des émissions comprend les émissions indirectes provenant de la consommation d'électricité, de chaleur et de vapeur, qui sont produites par d'autres et importées pour utilisation par l'Université.

¹⁰ Date cible reportée à juillet 2021.



objectif de 35 %). Cependant, il y a eu une baisse significative de 37 % par rapport à ses niveaux d'émissions de pointe en 2014/15. La Figure 4 montre la trajectoire future des émissions liées aux bâtiments, qui représentent la grande majorité des émissions totales de l'UEA. L'objectif de consommation d'énergie pour 2020 n'a pas non plus été atteint. Il y a eu une réduction de 4 % de la consommation d'énergie par rapport aux niveaux de 1990 et de 13 % par rapport aux niveaux de consommation de pointe de 2014/15. En effet, l'Université a connu une baisse progressive de ses émissions annuelles de CO₂ après avoir atteint son pic en 2015 (voir Figure 9).

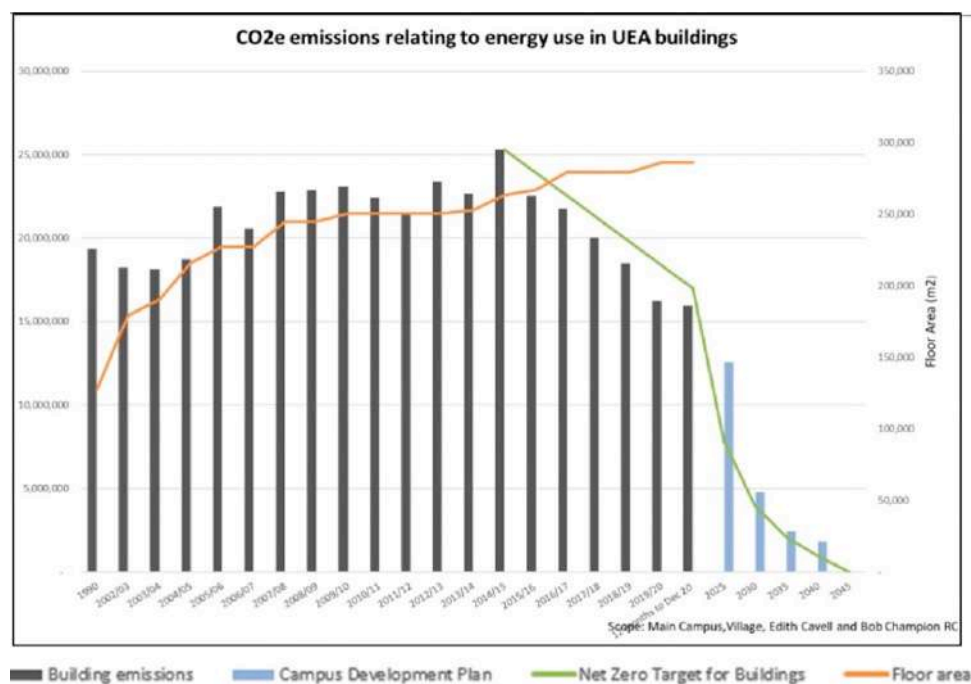


Figure 9 Émissions de CO₂ de l'UEA liées à la consommation d'énergie dans les constructions

Source : (UEA 2021c)

Récemment, l'UEA a développé un plan de gestion du carbone NetZero pour renforcer sa capacité à réduire ses émissions de CO₂. Parallèlement au nouveau Plan NetZero, le 11 février 2021, le Vice-chancelier de l'UEA a annoncé un nouveau plan pour parvenir à une neutralité en carbone. Le plan introduit plusieurs objectifs actualisés en matière d'énergie et d'émission de carbone, y compris une réduction des émissions de plus de 80 % du campus (Champ d'application 1 et 2) d'ici 2030 et une réduction des émissions totales (Champ d'application 3)¹¹ d'ici 2045 ou avant, tous deux basés sur les niveaux de référence de 2014/15. L'un des aspects clés de l'engagement est que l'Université s'engage à ne pas compter sur la compensation des émissions de carbone, ce qui signifie un abandon complet des combustibles fossiles pour son approvisionnement énergétique d'ici 2045 (UEA 2021a)¹².

Le Plan NetZero a proposé quelques mesures pour réduire la consommation d'énergie et les émissions associées. Deux activités liées à la réduction des émissions sont abordées, à savoir les émissions liées aux bâtiments et aux déplacements. Pour les émissions liées aux bâtiments, il y a quatre domaines sur

¹¹ Le Champ d'application 3 des émissions comprend toutes les autres émissions indirectes telles que les émissions résultant de la chaîne d'approvisionnement de l'organisation.

¹² Si la compensation venait à être essentielle, l'université donnerait priorité aux sources locales.



lesquels se concentrer, notamment la réduction de la demande énergétique, l'augmentation de l'efficacité énergétique, le développement des énergies renouvelables sur le campus et le développement des énergies renouvelables hors site. Outre la réduction des émissions liées aux bâtiments, l'UEA établit également des plans de réduction des émissions lors des déplacements, qui représentaient un cinquième des émissions totales en 2015. En 2018, plus de 55 % du personnel de l'UEA utilisait des voitures particulières pour leurs trajets domicile-travail. En outre, l'utilisation du transport aérien par le personnel de l'UEA et les étudiants internationaux représentait un quart des émissions liées aux voyages. Bien qu'une partie de ces voyages en avion soit essentielle pour les réunions et conférences de recherche de l'UEA, il existe des moyens de réduire les émissions en sélectionnant uniquement les voyages réellement nécessaires (Chalvatzis and Ormosi 2021). L'UEA adopte le cadre Éviter-Modifier-Améliorer, qui consiste à éviter les déplacements inutiles, à passer à des transports peu polluants et à améliorer l'utilisation des bus et des voitures électriques. Plus de détails sur les futures stratégies de mobilité peuvent être trouvés dans le Livrable 3.1.1

Les objectifs de réduction des émissions de carbone peuvent avoir des implications importantes sur les stratégies énergétiques à faible émission de carbone de l'UEA. Par exemple, entre 2020 et 2025, l'Université propose de mener une revue de la technologie et du site pour développer des plans de décarbonisation de l'approvisionnement en chauffage sur le campus. Elle est suivie de la mise en œuvre du Plan par l'adoption de pompes à chaleur entre 2025 et 2030. À plus long terme, l'UEA envisagera la combinaison de pompes à chaleur et à hydrogène pour fournir de la chaleur. En ce qui concerne la production d'électricité, l'université propose d'étendre sa capacité solaire photovoltaïque (et d'explorer l'installation potentielle d'une éolienne) ainsi que l'installation d'un système de stockage d'énergie électrique entre 2020 et 2030. Par exemple, il a été proposé d'installer des panneaux solaires photovoltaïques pour une capacité de 650 kW dans le bâtiment Sportspark. La mise en œuvre réussie du projet portera la capacité totale installée de panneaux solaires photovoltaïques à près de 1 MW à l'UEA.

Une autre mesure clé au cours de cette période consiste à éliminer progressivement la centrale de cogénération au gaz naturel d'ici 2028, qui a été une source majeure d'approvisionnement en énergie domestique à l'UEA depuis sa première mise en exploitation (UEA 2020). Lors de son installation initiale, la cogénération au gaz était considérée comme une technologie positive à faible émission de carbone, car l'électricité importée du réseau aurait une teneur en carbone plus élevée. Au sein de la zone FCE, la France est depuis plusieurs décennies un leader mondial de l'électricité à faible émission de carbone, et ce principalement grâce à son vaste programme d'énergie nucléaire civile. L'approvisionnement électrique du Royaume-Uni reposait auparavant sur un mélange de nucléaire, de charbon et de gaz naturel. Avec l'élimination progressive du charbon au Royaume-Uni et son remplacement principalement par des sources d'énergie renouvelables, le réseau électrique du Royaume-Uni a connu une baisse rapide de ses émissions. Plus précisément, le réseau électrique du Royaume-Uni a connu une baisse rapide des émissions de carbone par unité de production, représentée par l'abandon du charbon et l'adoption rapide de sources d'énergie renouvelables (en particulier l'énergie éolienne offshore). Par exemple, en 2020, un record de 5 167 heures de fonctionnement du réseau sans charbon a été observé, contre 3 666, 1 856 et 624 heures en 2019, 2018 et 2017. Les émissions moyennes de CO₂ par unité d'électricité consommée (appelée intensité carbone) étaient de 181 grammes de CO₂/kWh en 2020 (National Grid ESO 2021). L'intensité carbone quotidienne la plus faible était de 46 grammes de CO₂/kWh, ce qui souligne la progression vers un réseau électrique sans carbone dans un avenir proche. Une façon plus précise d'évaluer les émissions du réseau électrique serait d'examiner les émissions du cycle de vie, car elles incluent le trajet complet du carburant, mais même si cela est techniquement possible (Li et al. 2018), cela n'est pas pris en compte dans la plupart des évaluations.



Le point de basculement de la cogénération au gaz, en matière de ne plus être intéressante en termes de réduction des émissions approche à grands pas, et ce malgré ses niveaux d'efficacité énergétique élevés. Le système énergétique existant basé sur la cogénération au gaz devra être éliminé progressivement, car la consommation de combustibles fossiles doit être minimisée pour une décarbonisation de l'approvisionnement énergétique sur le campus. C'est un pas en avant nécessaire pour atteindre le niveau de zéro émission nette à l'UEA d'ici 2045. Ainsi, des efforts doivent être faits pour remplacer la cogénération au gaz pour à la fois les services d'électricité et de chauffage. L'une des alternatives pour l'approvisionnement en chauffage est l'utilisation de pompes à chaleur, tandis que d'autres options telles que le biométhane, le BioSNG ou l'hydrogène peuvent également devenir plus favorables à l'avenir. Tout comme le système de stockage thermique existant qui fournit une réserve pour l'approvisionnement en chaleur, il est impératif d'intégrer des unités plus flexibles pour optimiser le fonctionnement du système énergétique à l'UEA lorsque des sources d'énergie renouvelables seront adoptées pour remplacer les centrales de cogénération. Ces unités flexibles incluent, sans s'y limiter, des systèmes de stockage sur batteries et des technologies du côté de la demande, qui nécessitent de nouveaux investissements et une planification rigoureuse. Néanmoins, il est également nécessaire de réduire la demande de chaleur à l'UEA grâce à des améliorations de l'efficacité énergétique et à la rénovation des bâtiments (Burohappold Engineering 2018).

En outre, avec la décarbonisation accélérée de la production d'électricité au niveau national, l'UEA envisage d'augmenter les importations d'électricité du réseau à l'avenir. Cette option n'est cependant pas sans défis. Surtout, ceux-ci sont liés à une augmentation potentielle des coûts et à la mise à niveau nécessaire des réseaux de distribution. Cette problématique est au cœur des difficultés rencontrées par les territoires éloignés de la région FCE où la capacité du réseau présente des limitations même pour les zones qui ne sont pas insulaires. En effet, il y a toujours eu des défis budgétaires dans la mise en œuvre de solutions à faible émission de carbone. De plus, l'Université a dû reporter récemment plusieurs projets d'énergie à faible émission de carbone en raison des restrictions liées à la pandémie de COVID-19. Celle-ci a présenté un défi important pour l'Université à atteindre ses objectifs climatiques à court terme ; à la fois en raison de défis financiers et en raison de l'évolution des modes de travail et des opérations en général.

En effet, plusieurs mesures proposées dans la transition énergétique à l'UEA sont couvertes dans le projet ICE. Par exemple, l'une des mesures importantes pour contrôler la demande d'énergie est liée aux changements de comportement de consommation. Dans l'étude de cas de l'UEA, le projet ICE démontre un plan de gestion de la consommation d'énergie dans les résidences étudiantes par le biais d'un changement de comportement¹³. De plus, l'amélioration de l'efficacité énergétique est liée à l'adoption de technologies intelligentes qui permettent une utilisation optimisée de l'énergie.

3.3 Conclusions

Cette section présente l'optimisation du fonctionnement des technologies à faible émission de carbone et les futures stratégies énergétiques de l'UEA. Outre une meilleure efficacité opérationnelle, les technologies énergétiques à faible émission de carbone sont intégrées les unes aux autres et aident l'UEA à réduire sa consommation d'énergie et ses émissions de carbone. La centrale de cogénération et les chaudières à gaz atteignent leur efficacité de fonctionnement optimale grâce à l'installation d'un

¹³ Voir le Livrable 5.1 pour plus de détails.



système de stockage thermique. Le système de stockage thermique stocke la production de chaleur excessive pour une utilisation ultérieure via les systèmes de chauffage et de refroidissement urbains, et sont donc un exemple de meilleure utilisation des ressources. En outre, l'UEA a également adopté d'autres technologies/mesures et s'est engagée avec le personnel et les étudiants à atteindre ses objectifs climatiques.

L'Université s'est engagée à atteindre un niveau net zéro d'émission de carbone d'ici 2045, un moteur important pour les stratégies énergétiques à faible émission de carbone de l'UEA. Toute la production d'énergie à base de combustibles fossiles sera remplacée par des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne. Compte tenu de la variabilité de la production d'énergie renouvelable, des sources flexibles seront nécessaires, telles que des systèmes de stockage sur batterie et de réponses à la demande. D'autres technologies énergétiques et nouvelles, telles que l'hydrogène, sont également importantes dans le futur plan énergétique de l'UEA.

3.4 Références

- Burohappold Engineering (2018). UEA Utilities Infrastructure Strategy - Stage 1.
- Chalvatzis, K. and P. L. Ormosi (2021). "The carbon impact of flying to economics conferences: is flying more associated with more citations?" *Journal of Sustainable Tourism* **29**(1): 40-67.
- Li, X., K. J. Chalvatzis and D. Pappas (2018). "Life cycle greenhouse gas emissions from power generation in China's provinces in 2020." *Applied Energy* **223**: 93-102.
- National Grid ESO. (2021). "Record-breaking 2020 becomes greenest year for Britain's electricity." Retrieved 28 September, 2021, from <https://www.nationalgrideso.com/news/record-breaking-2020-becomes-greenest-year-britains-electricity>.
- Statista. (2021). "Thermal efficiency of combined cycle gas turbine stations in the United Kingdom (UK) from 2010 to 2019." Retrieved 28 Sep, 2021, from <https://www.statista.com/statistics/548943/thermal-efficiency-gas-turbine-stations-uk/>.
- UEA (2016). Target 2020. *Sustainable Ways - Energy and Carbon*, University of East Anglia.
- UEA (2017). Annual Environmental Sustainability Report 2017. *Sustainable Ways*, University of East Anglia.
- UEA (2020). NetZero UEA: What is it and how to achieve it? *Stakeholder workshops final report*, University of East Anglia.
- UEA. (2021a). "Energy Efficiency and Carbon Reduction." Retrieved 18 August, 2021, from <https://www.uea.ac.uk/about/university-information/sustainability/sustainable-campus/energy-efficiency-and-carbon-reduction>.
- UEA. (2021b). "Green Impact Programme." Retrieved 18 August, 2021.
- UEA (2021c). Sustainability Board Meeting Minutes April 2021, University of East Anglia.



4 Interventions mises en œuvre à l'UEA

Entre autres, deux technologies énergétiques à faible émission de carbone ont été mises en œuvre à l'UEA, à savoir le système de chauffage intelligent et le contrôle de fréquence. Les deux technologies s'appuient sur des ressources du côté de la demande en énergie, ce qui est complémentaire à l'optimisation du système d'approvisionnement énergétique de l'UEA (comme présenté dans les sections précédentes).

Cette section commence par le contexte de l'évolution de la structure de l'offre en raison de la pénétration des sources d'énergie renouvelables et de l'élimination progressive des combustibles fossiles dans le réseau électrique. Elle fait ensuite le lien avec les besoins croissants de services d'équilibrage, dont l'un provient de la maîtrise de la demande en énergie (MDE). La Section 1 donne une description de la MDE en termes de définition, de types, d'applications et d'avantages. Elle est suivie, en Section 2, par une introduction à la modernisation du chauffage intelligent. Celle-ci comprend les informations de base, les spécifications du système, les avantages et les défis du système. Un autre aspect clé de la solution énergétique intégrée à l'UEA est l'adoption de la réponse de fréquence. En fait, la réponse de fréquence fait partie de la solution technologique de la MDE, qui se développe rapidement au Royaume-Uni ces dernières années. La réponse de fréquence (FR) dans le cadre de la MDE générale fournit des services d'équilibrage au Royaume-Uni, sujet de la Section 3. Cette section commence par une introduction de la FR, sa définition, les types de FR, ainsi que ses exigences en matière de fourniture et de paiements. Cette information précise le statu quo de la FR au Royaume-Uni. Ensuite, elle présente la technologie Dynamic Demand installée par OpenEnergi sur le campus de l'UEA pour permettre la participation d'une réponse de fréquence ferme sur le marché britannique de l'électricité.

4.1 Maîtrise de la demande en énergie

Malgré la transition énergétique en cours, l'organisation du secteur électrique reflète l'économie et la technologie du 20^e siècle dans la plupart des pays. Le Royaume-Uni est l'un des leaders mondiaux de la réforme du secteur de l'électricité. Son expérience dans la construction d'un marché de l'électricité libéralisé depuis le début des années 90 a été introduite et mise en œuvre dans d'autres pays (Pollitt et al. 2017). La réforme antérieure du secteur de l'électricité était axée sur la séparation des activités concurrentielles des monopoles naturels, la réglementation des réseaux de transport et de distribution et la création d'un marché exclusivement énergétique. Depuis lors, la réforme a considérablement évolué, notamment après la révision du système électrique pour permettre les objectifs de décarbonisation du Royaume-Uni. Par conséquent, un changement radical de l'architecture du marché de l'électricité britannique a été introduit en 2013, connu sous le nom de Réforme du marché de l'électricité (EMR ou Electricity Market Reform en anglais). Dans le cadre de l'EMR, le gouvernement britannique a introduit quelques politiques pour décarboniser le système énergétique, en particulier le secteur de l'électricité, notamment des restrictions réglementaires sur la consommation de charbon et des propositions de plans d'abandon, l'introduction d'enchères de capacité, des tarifs de rachat (FiT ou feed-in-tariffs en anglais), des contrats de différence (CfD ou contracts for difference en anglais) et un prix plancher du carbone. Ces politiques encouragent la croissance de sources d'énergie décarbonisées, propres et durables (telles que l'énergie éolienne et solaire) en remplacement des combustibles fossiles.

La réforme précédente du secteur de l'électricité et les politiques d'EMR ont réussi à promouvoir la pénétration des sources d'énergie renouvelables et à réduire les émissions de CO₂ dans le secteur de l'électricité. La Figure 10 présente l'évolution du mélange de sources entre 1990 et 2019 au Royaume-



Uni. Elle montre que la production éolienne et solaire est passée de zéro en 1990 à 77,3 TWh en 2019. Au cours de la même période, la production d'électricité au charbon est passée de 229,8 TWh à 6,9 TWh.

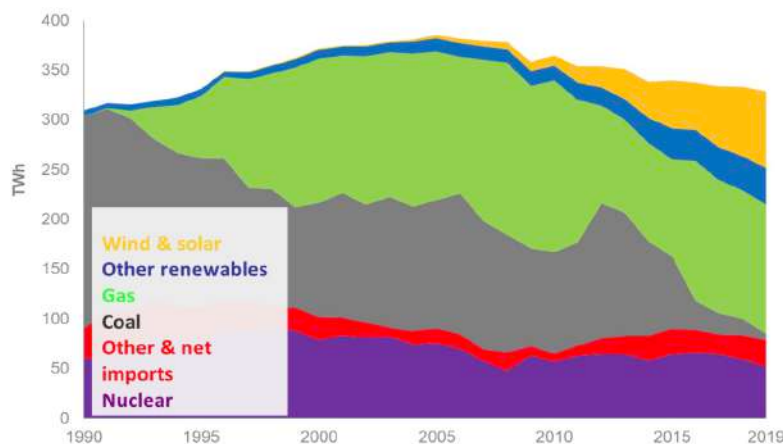


Figure 10 Production d'électricité par type de combustible entre 1990 et 2019

Source : (BEIS 2020)

L'EMR est notamment considéré comme un pas en avant vers un système électrique décarbonisé au Royaume-Uni puisqu'il a introduit des instruments politiques visant soutenir le développement des énergies renouvelables, limiter l'utilisation du charbon et améliorer la fiabilité de l'approvisionnement en électricité (Grubb and Newbery 2018). D'autre part, les niveaux croissants de pénétration des énergies renouvelables et leur nature variable en matière de production ont entraîné l'augmentation des coûts d'équilibrage. La Figure 11 montre le coût d'équilibrage en tant que part du coût de production et l'augmentation du prix d'équilibrage due à l'augmentation de la part des énergies renouvelables sur le marché britannique. Elle montre que le coût d'équilibrage en tant que part du coût de production augmente depuis 2010. Un pic a été observé début 2020 en raison d'une demande plus faible (en raison de la pandémie de COVID-19) et des prix de l'électricité plus bas (en raison de la forte production d'énergie renouvelable). En outre, à mesure que le niveau de pénétration des énergies renouvelables augmente, le prix d'équilibrage va encore augmenter.

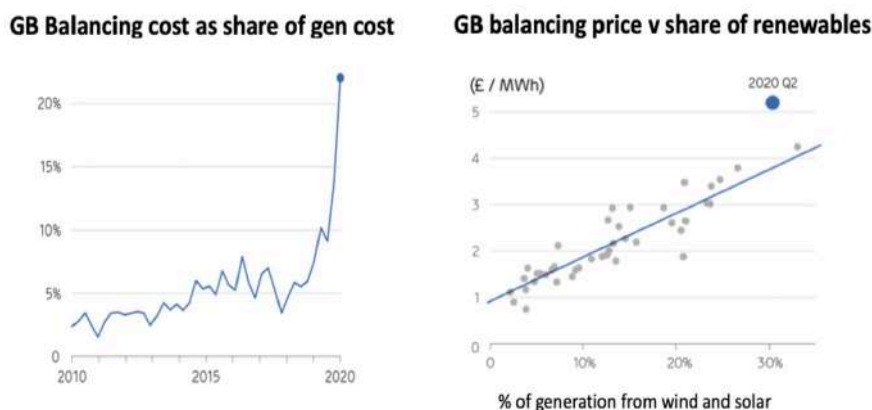


Figure 11 Augmentation de la pénétration des énergies renouvelables et du coût d'équilibrage en Grande-Bretagne

Source : (Drax 2020)



La tendance croissante des coûts d'équilibrage reflète l'importance croissante d'avoir des sources flexibles dans le réseau électrique. La flexibilité peut être définie de différentes manières. L'AIE, par exemple, définit la flexibilité comme la capacité du système électrique à réagir en temps opportun aux variations de l'offre et de la demande d'électricité (Chandler 2011). D'autres définitions de la flexibilité du système font également référence à la capacité de faire face à l'incertitude et à la volatilité à un coût minimum et d'assurer la fiabilité du système.

Traditionnellement, les services de flexibilité reposaient sur des centrales électriques à grande échelle, dans de nombreux cas des centrales à combustible fossile. La décarbonisation des systèmes électriques introduit la nécessité d'explorer de nouvelles sources de flexibilité. Avec la pénétration de l'électricité renouvelable et la fermeture des centrales électriques conventionnelles existantes (comme cela s'est produit avec plusieurs centrales électriques au charbon au Royaume-Uni), les alternatives de flexibilité incluent l'augmentation de la flexibilité des sources de production conventionnelles restantes, en s'appuyant davantage sur le réseau et une interconnexion avec d'autres systèmes, ainsi que sur des solutions de stockage et des mesures de maîtrise de la demande en énergie. Les rôles de ces différentes sources de flexibilité dépendront des ressources d'un système, des alternatives disponibles et de quelle combinaison de ressources est aujourd'hui et à l'avenir la plus économique lorsque les pressions environnementales seront plus importantes. En général, l'objectif est de développer et d'utiliser les ressources de flexibilité qui minimisent les coûts du système et assurent la fiabilité du système, tout en répondant également à d'autres objectifs politiques, notamment la décarbonisation ainsi que la démocratisation et l'autonomisation des consommateurs.

4.1.1 Définition de la Maîtrise de la demande en énergie

Le concept de MDE a été créé dans les années 1970 en réponse aux préoccupations croissantes concernant la sécurité de l'approvisionnement en pétrole et les impacts environnementaux de la production d'électricité aux États-Unis. Les programmes de MDE sont devenus populaires dans les années 1980, lorsque les services publics ont été encouragés à appliquer les principes de planification des ressources les moins coûteuses ou intégrées (Eto 1996). Le développement des programmes de MDE reflète les changements de stratégie dans la planification du système électrique, qui tient compte du fait que la MDE pourrait être plus rentable que la notion traditionnelle de production et de transmission d'électricité en vrac. De nos jours, la MDE est devenue un instrument important dans le fonctionnement du système électrique dans de nombreux pays.

Il n'existe aucune définition partagée de la MDE. Certaines définitions sont plus générales, tandis que d'autres offrent plus de détails. Une liste de définitions est donnée ci-dessous.

« La Maîtrise de la demande en énergie est la planification, la mise en œuvre et la surveillance des activités des services publics conçues pour influencer l'utilisation de l'électricité par les clients de manière à produire les changements souhaités dans la charge du service public, c'est-à-dire des changements dans le modèle temporel et l'ampleur de la charge d'un service public. Les programmes de services publics relevant de la Maîtrise de la demande en énergie comprennent : la gestion de la charge, les nouveaux usages, la conservation stratégique, l'électrification, la génération de clients et les ajustements de part de marché. »

(Gellings 1985)



« La Maîtrise de la demande en énergie est la planification, la mise en œuvre et le suivi des activités des services publics conçues pour influencer l'utilisation de l'électricité par les clients. »

(Gelazanskas and Gamage 2014)

« La MDE peut être définie comme des modifications du modèle de consommation d'énergie dans la demande d'énergie pour favoriser une meilleure efficacité et un meilleur fonctionnement des systèmes d'énergie électrique. »

(Behrangrad 2015).

En général, le concept de MDE fait référence aux changements dans les modèles de consommation d'énergie dans la demande d'énergie à l'appui du fonctionnement du système électrique.

4.1.2 Types de Maîtrise de la demande en énergie

Les changements dans les modes de consommation d'énergie comprennent généralement deux types d'activités. Le premier type d'activités se concentre sur la réduction de la consommation d'énergie sur une longue période grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique, également appelées activités d'économie d'énergie. L'énergie peut être économisée en modifiant le comportement de consommation (comme une température ambiante réduite en hiver) et en passant à des technologies à faible consommation d'énergie (comme le remplacement d'anciens appareils inefficaces par des appareils plus efficaces). Les premiers encourrent généralement des coûts faibles ou nuls, tandis que les seconds nécessitent un investissement en capital. L'un des exemples les plus significatifs d'activités d'économie d'énergie est la transition vers un éclairage efficace. Le remplacement des ampoules à incandescence traditionnelles par des ampoules écoénergétiques telles que les ampoules à incandescence halogène, des lampes fluorescentes compactes (CLF) et des ampoules à diodes électroluminescentes (DEL) peut réduire la consommation d'énergie jusqu'à 80 % (Ganandran et al. 2014). Au niveau national, la transition vers un éclairage efficace peut conduire à d'importantes économies d'énergie. Par exemple, une étude récente sur les économies d'énergie résultant du déploiement de la technologie à DEL en Inde montre que les économies d'énergie annuelles se sont élevées à 30 milliards de kWh entre 2014 et 2018 (Kamat et al. 2020). Ce qui est important en tant que caractéristique déterminante d'une telle intervention, c'est qu'elle ne nécessite aucune implication significative de l'utilisateur, autre qu'en termes de l'achat et de l'installation de nouvelles ampoules. Une fois cela effectué, les économies d'énergie se produisent uniquement en raison des mérites de la nouvelle technologie, sans que l'utilisateur ne modifie son comportement en termes de réduction de l'utilisation de l'éclairage, etc.

L'autre type d'activités se concentre sur la consommation d'énergie en fonction des conditions générales de l'offre et de la demande. Cela conduit généralement à un modèle de consommation différent, appelé réponse à la demande. Contrairement au changement de comportement ci-dessus, ce type de changement de comportement entraîne une modification de la consommation dans un court laps de temps. Ces changements sont généralement motivés par une conception tarifaire efficace et des incitations favorables qui encouragent le changement de comportement. Par exemple, les tarifs selon

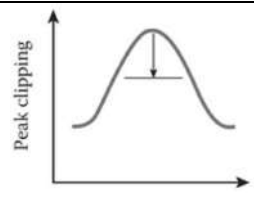
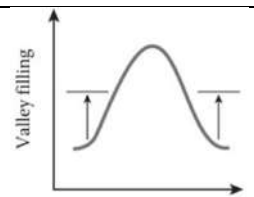


l'heure d'utilisation (TOU ou time-of-use en anglais) permettent de distinguer les périodes de pointe et les périodes creuses, ce qui incite les consommateurs à basculer leur consommation vers les périodes creuses lorsque les prix de l'énergie sont plus bas. La tarification de pointe critique est utilisée pour facturer de nombreux tarifs normaux pendant les périodes de forte charge du système, ce qui encourage les consommateurs à réduire leur consommation pendant ces périodes de pointe critiques et à passer leur consommation à une autre période où les prix sont plus bas.

La demande en énergie est un élément important de la transition énergétique. Premièrement, la participation des consommateurs est vitale pour atteindre l'objectif de neutralité carbone. La flexibilité du système électrique est cruciale pour permettre une plus grande utilisation des sources d'énergie à faible émission de carbone qui produisent de l'électricité de manière variable. Leurs investissements dans l'électrification du chauffage, de la mobilité et d'autres équipements sont essentiels pour réduire la consommation de combustibles fossiles et augmenter l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire, entre autres. Par la suite, cette électrification ouvre la porte à une demande plus maîtrisée et flexible, qui permet une source potentiellement plus importante de fournisseurs en électricité décarbonisée, nécessaire pour aider à équilibrer le système électrique.

4.1.3 Applications de la MDE

Le but de l'utilisation de la MDE est d'influencer le modèle de consommation d'électricité qui peut être utile pour atteindre les objectifs sélectionnés (Gellings 1985). Il peut y avoir un ou plusieurs objectifs, allant de l'aide au fonctionnement du système (par exemple, réduire la demande de pointe, conserver les ressources énergétiques et améliorer la fiabilité du système) à l'amélioration des performances des services publics (par exemple, augmenter les revenus, réduire les émissions). Les objectifs définis sont ensuite traduits en changements souhaités de la demande en énergie, qui peuvent illustrer les changements potentiels par la mise en œuvre d'un programme de MDE spécifique. Le Tableau 3 montre les six types de changements de modèle de la demande, y compris l'écrêtage de pointe, le remplissage des creux, le déplacement de charge, la conservation stratégique, l'augmentation stratégique de charge et la forme de charge flexible.

Changement de forme de charge	Description
	<p>L'écrêtage de pointe - ou la réduction des charges de pointe du système, incarne l'une des formes classiques de maîtrise de la charge et est maintenant communément appelé réponse à la demande en énergie. L'écrêtage de pointe est généralement considéré comme la réduction de la charge de pointe en utilisant des options tarifaires basées sur les horaires ou des stratégies basées sur des incitations, avec ou sans technologies de mise en œuvre.</p>
	<p>Le remplissage des creux englobe la création de charges hors des périodes de pointe. Le remplissage des creux peut être effectué de plusieurs manières. L'une des plus populaires consistant à déplacer les charges alimentées par des combustibles fossiles par des charges électriques qui fonctionnent pendant les périodes creuses (par exemple, le chauffage de l'eau et/ou le chauffage des locaux).</p>



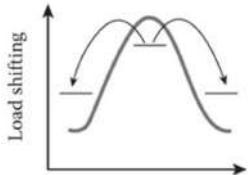
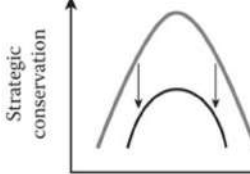
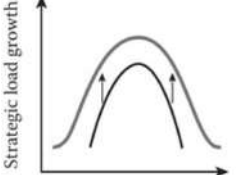
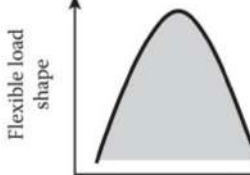
	<p>Le transfert de charge consiste à déplacer la charge des périodes de pointe aux périodes creuses. Les applications populaires incluent l'utilisation du chauffage de l'eau de stockage, du chauffage des espaces de stockage, du stockage de la fraîcheur et du transfert de charge client.</p>
	<p>La conservation stratégique est le changement de forme de charge qui résulte des programmes axés sur la consommation finale. Non considéré normalement comme une gestion de charge, le changement reflète une modification de la forme de la charge impliquant une réduction de la consommation ainsi qu'un changement dans le mode d'utilisation.</p>
	<p>La croissance stratégique de la charge est le changement de forme de la charge qui fait référence à une augmentation générale des ventes. La croissance de la charge peut impliquer une part de marché accrue des charges qui sont ou peuvent être desservies par des combustibles concurrents, ainsi qu'un développement économique. La croissance de la charge peut inclure l'électrification de secteurs qui étaient auparavant basés sur des combustibles fossiles tels que les transports et le chauffage.</p>
	<p>La forme de charge flexible est un concept lié à la fiabilité du système électrique. La forme de la charge peut être flexible si les consommateurs se voient proposer des options quant aux variations de qualité de service qu'ils sont prêts à autoriser en échange de diverses incitations. Le programme concerné peut être des variations de charge interruptible ou réductible ; des concepts de systèmes mutualisés et intégrés de gestion de l'énergie ; ou des dispositifs individuels de contrôle de charge client offrant des limitations de service.</p>

Table 3 Six types de changements de modèle de la demande

Source : Adapté de Gellings and Parmenter (2017), Figure 13.3

La mise en œuvre de la MDE peut apporter plusieurs avantages au niveau de l'exploitation du système électrique. Par exemple, Strbac (2008) a examiné les avantages de la mise en œuvre de la MDE au Royaume-Uni. Les principaux avantages comprennent le report ou l'évitement total d'investissements dans de nouvelles capacités de production (principalement des unités à gaz) ou des investissements dans de nouvelles infrastructures de réseau. De plus, les avantages comprenaient la décongestion des réseaux de distribution et la réduction des émissions de CO₂. L'étude a également passé en revue les principales techniques de mise en application de la MDE, notamment

- Chauffage de nuit avec commutation de charge
- Contrôle direct de la charge
- Limiteurs de charge
- Programmes commerciaux/industriels
- Régulation de la fréquence
- Tarification selon l'heure d'utilisation
- Appel d'offres d'énergie
- Compteurs et appareils intelligents

L'UEA a cherché activement à fournir des services de flexibilité au système électrique, en utilisant des mesures dans la demande en énergie. Par exemple, elle a fourni des services de contrôle de la fréquence



au réseau en utilisant le système de demande dynamique. Une mesure de la demande en énergie mise en œuvre plus récemment est l'expérience sur le chauffage intelligent. Dans les sections suivantes, nous introduisons d'abord le concept de la maîtrise de la demande en énergie ainsi que les types et les applications de la MDE, avant d'introduire les mesures de demande en énergie adoptées sur le campus de l'UEA.

4.2 Rénovations nécessaires pour un chauffage intelligent

Le chauffage représente plus de la moitié de la consommation totale d'énergie de l'UEA. La consommation annuelle de chaleur a été stable au cours des cinq dernières années, avec seulement une légère augmentation, passant de 31,3 GWh en 2016/17 à 33,8 GWh en 2020/21, malgré une baisse significative en 2019/2020 en raison du confinement lié à la pandémie de COVID-19. La majeure partie de la chaleur a été consommée dans les bâtiments universitaires, qui représentent environ les deux tiers de la consommation totale de chaleur. Le reste a été consommé dans des immeubles résidentiels.

L'UEA compte 15 bâtiments résidentiels. Les cinq principaux consommateurs de chaleur, dont Norfolk Terrace, Suffolk Terrace, INTO, Britten et Crome Court, représentent 58 % de la consommation totale de chauffage des bâtiments résidentiels. Il existe des variations importantes en termes de consommation de chaleur par lit, ce qui montre une opportunité potentielle d'économie d'énergie grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Par exemple, en 2020/21, le bâtiment le moins écoénergétique était le bâtiment Crome Court avec 3 114 kWh par lit, par rapport au bâtiment le plus écoénergétique, le bâtiment Colman avec 1 340 kWh par lit. En général, la consommation de chaleur par lit a diminué dans tous les bâtiments résidentiels au cours des cinq dernières années.

Comme mentionné dans la Section 2, l'Université a adopté plusieurs technologies à faible émission de carbone pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les impacts environnementaux de son approvisionnement énergétique. Malgré d'importants changements d'infrastructure, des quantités importantes d'énergie continuent d'être gaspillées dans les bâtiments résidentiels du campus de l'UEA (> 20 %), alors que le confort thermique des occupants demeure un problème. L'« invisibilité » de la consommation d'énergie et le manque de contrôle des occupants sur les températures de chauffage dans les dortoirs de l'UEA continuent d'empêcher des comportements écoénergétiques et de saper les niveaux de confort expérimentés.

Par le développement d'un système de chauffage intelligent et par la fourniture d'un retour d'expérience pertinent sur la consommation d'énergie, nous visons à : (a) sensibiliser les gens à leur consommation d'énergie, (b) améliorer l'efficacité et permettre la flexibilité du système et (c) optimiser le contrôle du chauffage pour maximiser le confort intérieur et même prévoir, dans un avenir proche, le comportement du bâtiment et la consommation d'énergie en vue d'une automatisation améliorée et davantage de flexibilité envers les technologies énergétiques à faibles émissions de carbone.

4.2.1 Conception du système

Le système de chauffage intelligent conçu et développé dans les bâtiments résidentiels du campus de l'UEA comprend 6 composants clés, notamment du matériel, des logiciels et des composants réseau (voir Figure 12 pour une représentation schématique simplifiée du système) :



1. Un systeme de contrôle par zone qui permet le contrôle indépendant du chauffage dans une chambre individuelle d'un étudiant (auparavant géré de manière centralisée au niveau de l'appartement).
2. Des vannes de radiateur thermostatiques programmables (PTRV) installées dans des pièces individuelles. Ceux-ci fonctionnent sur batterie et sont équipés de vannes motorisées et de capteurs de température pour contrôler le débit d'eau chaude vers les radiateurs en fonction d'un programme de température cible spécifié pour la pièce où se trouve le radiateur. (NB - Contrairement aux VTR classiques qui ne sont réglables qu'à 5 ou 6 niveaux différents et, par conséquent, laissent les utilisateurs sans une compréhension claire de quelle température correspond à chaque niveau, ces PVTR permettent de définir des températures exactes).
3. Un contrôleur central qui communique sans fil avec les PTRV et à travers lequel les horaires des températures cibles peuvent être définis à distance. (NB - Les réglages de température peuvent être modifiés manuellement par les occupants si/quand cela est nécessaire).
4. Des Capteurs pour surveiller les conditions extérieures et la température intérieure (ambiante) - connectés, via des actionneurs, aux unités/système de chauffage pour contrôler leur fonctionnement conformément aux instructions reçues par l'algorithme de contrôle. Ceux-ci permettent le contrôle automatique de la position Marche/Arrêt des unités de chauffage en fonction de : (a) les conditions météorologiques extérieures, (b) la température intérieure et/ou (c) si les fenêtres sont ouvertes (c'est-à-dire la fonction qui commute la vanne du radiateur lors de la ventilation de la pièce).
5. Une interface utilisateur sans fil qui permet aux utilisateurs de configurer et de planifier les profils de chauffage/températures de consigne et de recevoir des informations sur les conditions extérieures et intérieures et sur la consommation d'énergie. Jusqu'à six points de consigne par jour et trois températures de point de consigne différentes peuvent être réglés, et les utilisateurs peuvent également choisir parmi trois modes de fonctionnement prédéfinis - à savoir les modes « Éco », « Vacances » et « Jour de repos » en fonction de leur présence et besoins spécifiques.



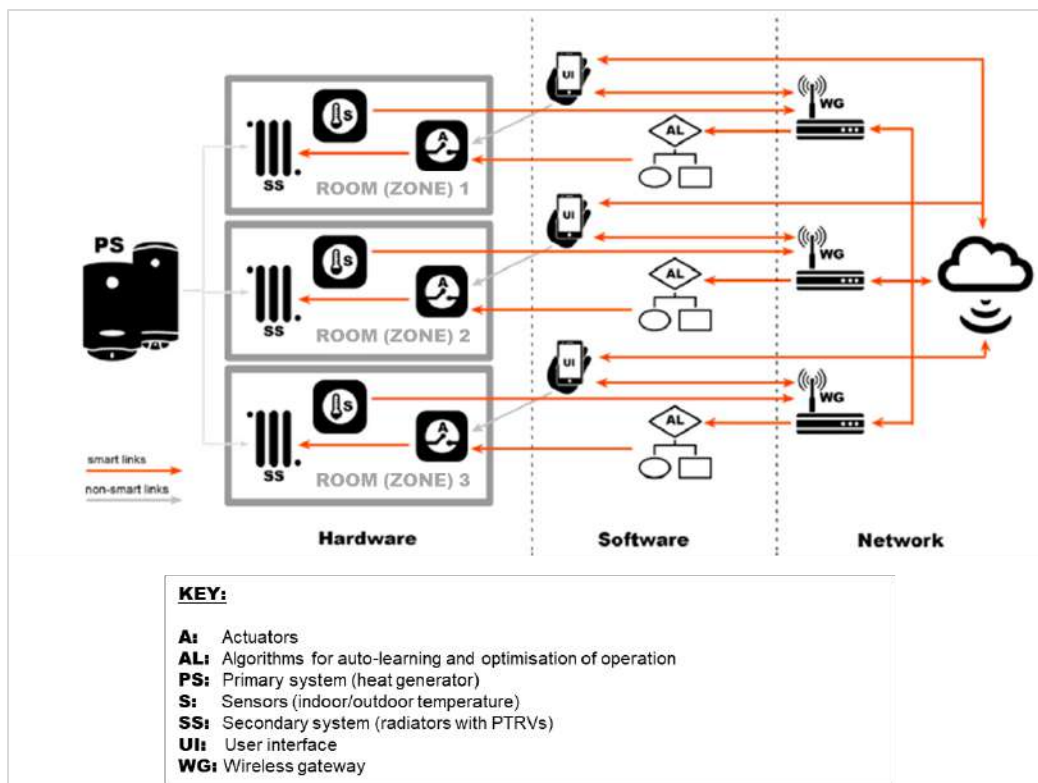


Figure 12: Représentation schématique de tous les composants et branchements du système de chauffage intelligent conçu et installé dans des unités résidentielles multizones sur le campus de l'UEA. (NB – Bien que les appartements pour étudiants de l'UEA comprennent généralement 8 à 10 chambres individuelles, dans un souci de simplicité, le schéma n'inclut que 3 chambres/zones.)

4.2.2 Solution mise en œuvre

Les systèmes de chauffage intelligents ; et les technologies énergétiques intelligentes en général ; sont largement considérés comme des solutions technologiques pour une transition vers une énergie à faible émission de carbone. Le système pilote spécifique de l'UEA devait permettre l'expérimentation et la démonstration d'une telle technologie. De plus, un certain nombre d'avantages étaient attendus du fait que cette modernisation par ailleurs simple transforme radicalement l'approche du chauffage dans les dortoirs des étudiants. Spécifiquement :

1. Ce système offre un moyen économique d'obtenir un contrôle optimal du chauffage. Une opération de modernisation avec un système intelligent ne nécessite pas le remplacement du système principal lui-même, car ses composants individuels sont conçus pour être facilement connectés sans fil aux systèmes existants.
2. Le système permet de diviser les bâtiments résidentiels en zones de chauffage indépendantes. En permettant le contrôle du chauffage dans chaque zone (pièce) en fonction des besoins et des habitudes spécifiques des utilisateurs au lieu de dépendre du contrôle du chauffage central, le confort et la commodité des occupants devraient s'améliorer.
3. Grâce à son optimisation en temps réel, le système prend en compte les informations incluant les conditions extérieures, la présence des occupants, la température intérieure actuelle et la température de confort souhaitée pour permettre une utilisation efficace de l'énergie sans compromettre le confort.



4. Les interfaces utilisateur offrent un moyen à la fois efficace et simple de gérer le système en fonction des préférences de confort personnalisées tout en étant conscient de l'effet que les actions des occupants provoquent sur les performances du système. Par conséquent, l'un des paramètres les plus importants de la performance du système, à savoir le comportement des utilisateurs, peut ainsi être étudié (voir Livrable 5.1.1).

5. Les interfaces utilisateurs permettent de comparer un profil d'utilisateur unique avec celui d'autres utilisateurs similaires et, ainsi, offrent l'opportunité de développer une compréhension des besoins et des pratiques liés à l'énergie sur le campus de l'UEA.

Défis de la mise en œuvre du système énergétique intelligent

La capacité du système à atteindre ses objectifs clés (à savoir sensibiliser les gens à la consommation d'énergie, maximiser l'efficacité et optimiser le contrôle du chauffage) pourrait, à terme, être compromise par 4 défis technologiques et sociaux clés :

1. Étant donné que les bâtiments résidentiels du campus de l'UEA sont dotés de compteurs centralisés, le recours à des compteurs à pince enregistrant la consommation d'énergie (débitmètres de gaz) au niveau de la pièce (au lieu de l'appartement ou du bâtiment) signifie que la qualité des données peut être compromise.
 - La distribution de la vitesse d'écoulement devient irrégulière en raison de coudes dans la tuyauterie ou de variations dans le diamètre de la tuyauterie. La dérive se produit lorsque le centre de distribution de la vitesse d'écoulement s'éloigne du centre du tuyau. Un écoulement tourbillonnaire se produit lorsque le fluide tourne autour d'un axe central, parallèle au sens de l'écoulement. À la fois le un écoulement tourbillonnaire et la dérive provoquent des distributions irrégulières de la vitesse d'écoulement. Effectuer des mesures de débit dans ces conditions peut entraîner des erreurs.
2. De même, la proximité des capteurs de température intérieure des sources de chaleur peut entraîner des mesures de température imprécises et, par conséquent, un contrôle sous-optimal.
3. Les PTVR sont alimentés par batterie. Celles-ci doivent être remplacées une fois par an (en moyenne). Étant donné la très petite échelle de l'étude pilote de l'UEA ce facteur n'a pas posé de problème. En revanche, dans le cadre d'un déploiement à grande échelle de ces technologies sur les campus universitaires, la gestion/maintenance pourrait s'avérer plus difficile.
4. Plus important encore, l'efficacité du système à réduire la consommation d'énergie tout en améliorant le confort des occupants dépend en fin de compte de l'utilisation du système par les occupants. Si les occupants rejettent ou abusent du système, l'UEA ne sera pas en mesure de réaliser tous les avantages associés à une utilisation plus efficace de l'énergie.
 - Malgré d'importants automatismes (par ex. fonction de désactivation automatique lorsque les fenêtres sont ouvertes), les occupants peuvent : (a) choisir de réinitialiser les températures de consigne à des points plus élevés - consommant ainsi plus d'énergie, (b) désactiver les fonctions et/ou (c) ne pas activer les modes d'économie d'énergie lorsqu'ils sont hors campus.
 - Étant donné que les étudiants vivant sur le campus de l'UEA ne paient pas leurs factures d'énergie, il n'y a pas de réelles incitations économiques pour eux à faire bon usage des technologies en maîtrisant/réduisant leur consommation d'énergie.



4.2.3 Intégration du système de chauffage intelligent dans les systèmes énergétiques existants et futurs à faible émission de carbone à l'UEA

L'installation et le fonctionnement du système de chauffage intelligent peuvent être un élément important vers une transition énergétique globale à faible émission de carbone à l'UEA. Voici quelques raisons à cela :

a) Il peut renforcer les solutions à faible émission de carbone axées utilisateur à l'UEA.

L'engagement des utilisateurs est considéré comme un moyen rentable de réduire la consommation d'énergie. Comme mentionné dans la Section 2, plusieurs activités sont mises en œuvre à l'UEA visant à améliorer la performance énergétique du point de vue de l'utilisateur. Plusieurs activités à plus petite échelle ont été mises en œuvre, illustrant l'approche axée sur l'utilisateur adoptée dans la stratégie énergétique par l'équipe de gestion des bâtiments de l'UEA. Par exemple, lors d'une « grande campagne d'extinction pendant le weekend », l'équipe de gestion des bâtiments s'est entretenue avec le personnel travaillant au Teaching Wall (le nom de l'UEA pour une grande partie de ses salles de classes) afin de leur rappeler d'éteindre leurs ordinateurs et autres équipements pendant un weekend et autres possibilités de jours fériés. La campagne a permis d'économiser 10 000 kWh d'électricité et 11 000 £ de coût grâce à d'une coupure de courant de 6 heures dans le bâtiment. Des effets d'accumulation peuvent être attendus si des activités similaires étaient mises en œuvre dans d'autres bâtiments. De plus, les membres de l'équipe de gestion des bâtiments ont consulté les utilisateurs lors des projets de mise à niveau vers un éclairage à DEL. Avant de prendre une décision sur la manière de procéder à la mise à niveau, ils ont discuté avec les utilisateurs de leurs expériences sur l'éclairage (par exemple, les pièces étaient trop sombres ou trop claires, la facilité d'utilisation des commandes de l'éclairage, etc.).

L'installation et l'utilisation du système de chauffage intelligent peuvent renforcer l'approche orientée utilisateur existante en élargissant le groupe d'utilisateurs aux étudiants. Le projet comprend plusieurs activités d'engagement avec les étudiants par le biais de groupes de discussion, de sondages et d'entrevues. Le Livrable 5.1.1 présente en détail les activités d'engagement client de ce projet. Il comprend l'évaluation des attitudes des étudiants envers l'énergie, l'évaluation de leur comportement de consommation, la consultation de leurs opinions sur les technologies de chauffage intelligent et la démonstration des technologies. Les élèves étaient bien informés sur la technologie adoptée, sur leurs moyens de participer et sur les résultats possibles de leur participation.

b) Il s'intègre aux systèmes énergétiques à faible émission de carbone existants et peut contribuer au futur plan de développement d'une solution à faible émission de carbone grâce à une gestion flexible des consommations de chauffage dans les bâtiments résidentiels.

La consommation de chaleur des bâtiments résidentiels représente un tiers de la consommation totale de chaleur de l'UEA. À l'heure actuelle, l'approvisionnement en chauffage repose sur des unités de cogénération et des chaudières à gaz pour la production et sur un système de stockage thermique pour le stockage. Les solutions du côté de l'offre peuvent être mieux utilisées dans une approche intégrée grâce à une meilleure gestion de la demande de chaleur. Il peut réduire efficacement la consommation de chaleur, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles dans un avenir proche.



L'université prévoit d'augmenter les importations d'électricité en raison de la décarbonisation accélérée de l'approvisionnement en électricité du réseau. Parallèlement à la fermeture proposée des unités de cogénération, il est également prévu de passer à des pompes à chaleur pour les besoins en chauffage sur le campus. Le remplacement de la technologie ainsi que le passage à l'électricité pour l'approvisionnement en chaleur entraîneront inévitablement une augmentation de la consommation d'électricité du réseau. Comme indiqué dans le Livrable 3.1, la consommation d'électricité aux heures de pointe est considérablement plus coûteuse que celle pendant les heures creuses. Cela reflète l'utilisation de combustibles fossiles coûteux pour produire de l'électricité lorsque la demande est très élevée. En règle générale, les coûts sont inférieurs lorsque la demande est principalement couverte par des technologies énergétiques à faible coût et à faible émission de carbone. Si la consommation de chaleur pouvait être mieux gérée grâce à l'adoption d'un système de chauffage intelligent à grande échelle, il peut être utile de réduire les factures d'électricité et, surtout, de consommer de l'énergie lorsqu'elle est produite par des technologies énergétiques à faible émission de carbone.

c) Il offre de nouvelles opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique

Malgré une baisse progressive de la consommation de chaleur dans les bâtiments résidentiels, il existe des variations importantes de la consommation de chaleur par lit dans les différents bâtiments résidentiels. Un certain nombre de mesures ont été adoptées pour améliorer la performance énergétique des bâtiments résidentiels, notamment la rénovation des pièces, la pose de doubles vitrages, etc. Il existe cependant encore d'autres possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Le système de chauffage intelligent offre une nouvelle approche pour réduire les émissions en améliorant l'efficacité énergétique grâce à l'engagement des utilisateurs. Le contrôle plus granulaire du chauffage à différentes périodes et avec des réglages de température plus précis offre un moyen efficace d'augmenter les économies en demande de chaleur. Un autre élément important de la participation des utilisateurs est qu'elle peut améliorer la sensibilisation des utilisateurs aux problèmes liés au changement climatique en général et à la transition de l'approvisionnement énergétique plus particulièrement. Ces points sont fondamentaux pour une mise en œuvre réussie du Plan NetZero de l'UEA ainsi que pour la transition vers une énergie à faible niveau de carbone au niveau national.

d) Il offre un moyen rentable de réduire la consommation d'énergie et les émissions

L'UEA a mis en œuvre une série d'investissements pour réduire sa consommation d'énergie, notamment une mise à niveau des éclairages avec des ampoules à DEL ainsi que le remplacement des équipements anciens et inefficaces. Ces projets étaient relativement peu coûteux, mais présentaient de bonnes opportunités d'économies d'énergie et de réduction des émissions. Par exemple, l'Université a lancé 17 petits projets visant à améliorer l'efficacité énergétique sur le campus de l'UEA entre 2016 et 2020 dans le cadre du programme de financement SALIC. Trois activités principales ont été parrainées, dont la mise à niveau de l'éclairage (6 projets), l'isolation des bâtiments (2 projets) et le remplacement de l'équipement (9 projets). L'investissement total était de 523 432 £. Cela a conduit à des économies annuelles de consommation d'électricité de 1 893 MWh et à des économies annuelles associées en coûts (184 447 £) et d'émissions de CO₂ (540 tonnes). Les projets avaient une période d'amortissement moyenne de 2,8 ans, allant de 0,4 à 6,9 ans. 15 des 17 projets ont montré des économies d'énergie de plus de 50 % ; tandis que 3 projets ont connu une réduction de plus de 90 % de la consommation d'énergie. Un projet clé était lié à la mise à niveau de l'éclairage par des ampoules à DEL dans le bâtiment SCVA, avec un investissement total de 154 352 £. La consommation totale d'électricité est



passée de 503 224 kWh à 51 164 kWh par an. Les économies de coûts annuelles sont de 55 355 £, ce qui se traduit par une période d'amortissement de 2,8 ans.

À l'instar des projets SALIC, l'extension potentielle du système de chauffage intelligent offre également un moyen rentable de réduire la consommation de chauffage dans les bâtiments résidentiels. Le système de chauffage intelligent ne nécessite pas de dépenses importantes en équipement. Ses coûts d'exploitation et d'entretien sont négligeables.

4.2.4 Résultats de la mise en œuvre du système de chauffage intelligent

Cette sous-section présente les performances du système de chauffage intelligent en général et son impact sur la consommation de gaz dans les dortoirs de l'UEA. Une analyse plus détaillée est disponible dans le Livrable 5.1.1.

Les Figures 13 et 14 ci-dessous comparent la consommation hebdomadaire de gaz des élèves participant à l'expérimentation du système de chauffage intelligent (Living Lab) à celle des élèves n'ayant pas participé à l'expérimentation (Appartement témoin). Deux expériences ont été menées dans deux bâtiments différents (UEA Village Courtyard A et UEA Village Courtyard B). Des modèles de consommation similaires ont pu être observés dans les deux études de cas. Cela démontre qu'après une période initiale de familiarisation avec le système, les étudiants ont commencé à utiliser activement avec le système. Cela a permis de réaliser d'importantes économies en consommation de gaz. Cependant, les étudiants sont revenus à des comportements de chauffage plus énergivores après environ 14 semaines de résidence dans le Living Lab.

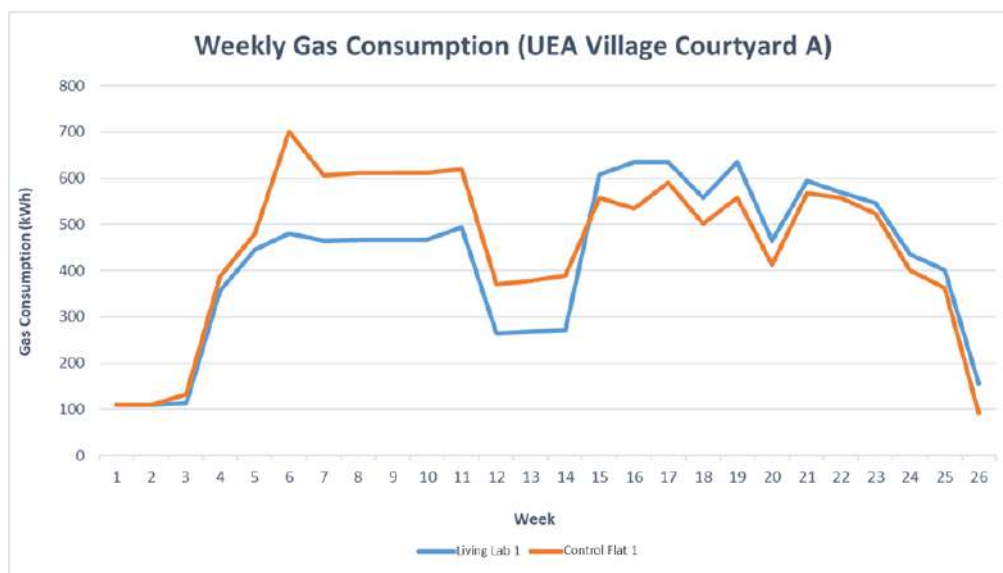


Figure 13: Consommation hebdomadaire de gaz (chauffage) dans le Living Lab et les Appartements témoins 1 (UEA Village, Courtyard A). NB : La baisse de la consommation d'énergie entre les semaines 12 et 14 (pour les deux appartements) est attribuée à la période des vacances d'hiver où la majorité des étudiants étaient absents de leur chambre sur le campus pendant plusieurs jours/semaines.



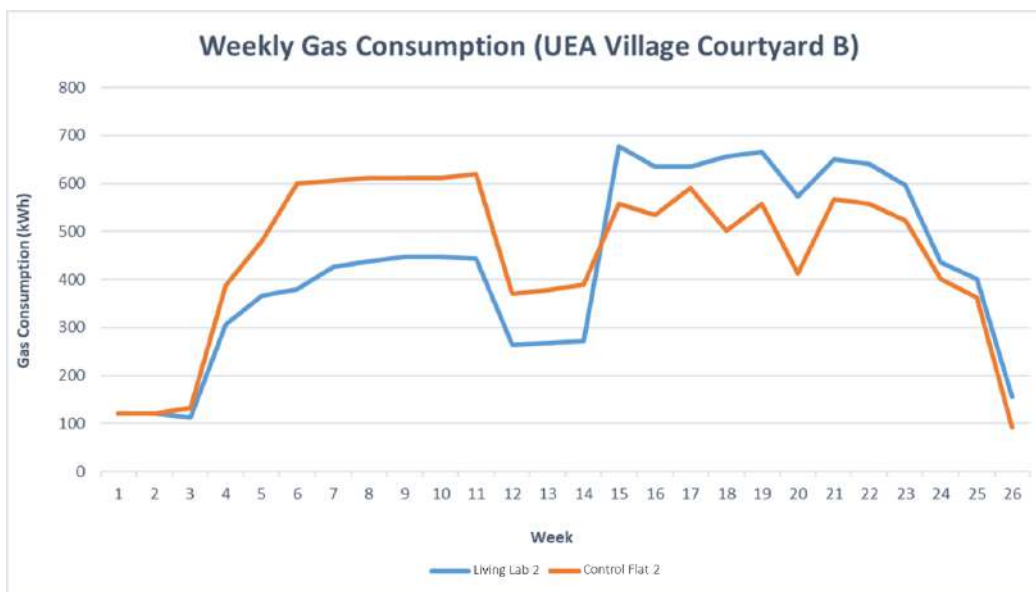


Figure 14: Consommation hebdomadaire de gaz (chauffage) dans le Living Lab et les Appartements témoins 2 (UEA Village, Courtyard B). NB : La baisse de la consommation d'énergie entre les semaines 12 et 14 (dans les deux appartements) est attribuée à la période des vacances d'hiver où la majorité des étudiants étaient absents de leur chambre sur le campus pendant plusieurs jours/semaines.

Néanmoins, la mise en place du système de chauffage intelligent a permis de réaliser des économies de consommation de gaz sur une période de 26 semaines (Voir Figure 15). Une meilleure stratégie de communication et des paramètres plus intuitifs peuvent faciliter un niveau de participation plus élevé à l'avenir. Le Livrable 5.1.1 fournit des explications détaillées sur les solutions.

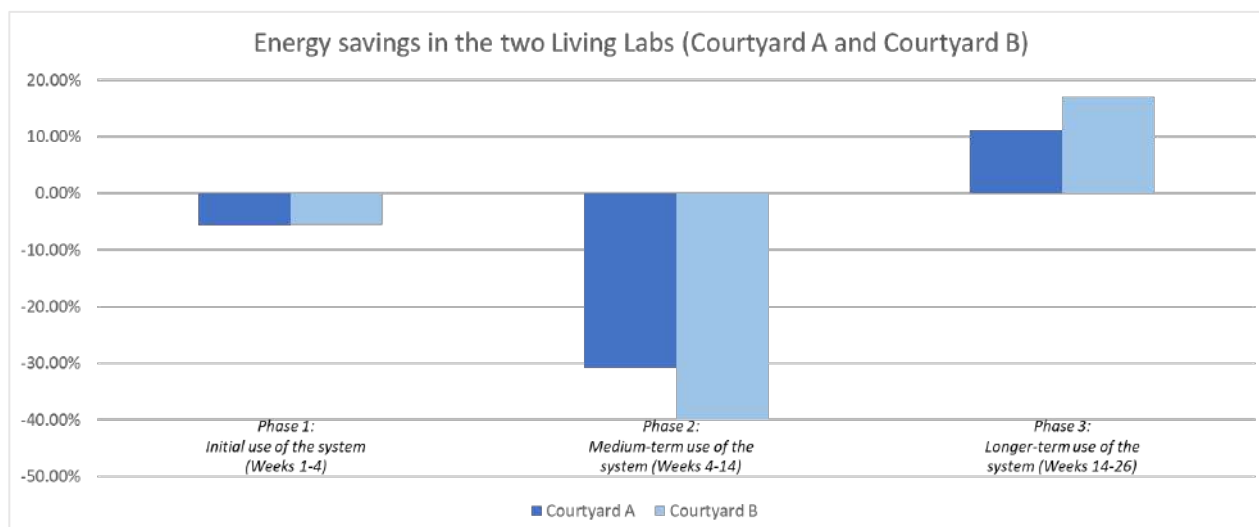


Figure 15: Économies d'énergie dans les deux Living Labs de l'UEA (par rapport aux Appartements témoins de Courtyard A et Courtyard B respectivement)



4.3 Réponse de fréquence

4.3.1 Réponse de fréquence - Description

La fréquence du système électrique est une variable en constante évolution qui est déterminée et contrôlée par l'équilibre seconde par seconde (en temps réel) entre la demande du système et la production totale (National Grid ESO 2021b). Si les variations en demande ne peuvent pas être compensés par la production, il y aura des baisses et des augmentations de la fréquence du système. Il est important de maintenir la fréquence du système à un niveau standard (par exemple 50 Hz en Grande-Bretagne ou 60 Hz aux États-Unis). Des écarts supérieurs à 1 % par rapport au niveau de fréquence standard (supérieur ou inférieur) peuvent entraîner une instabilité du système électrique et endommager les équipements et les infrastructures. La National Grid ESO gère la fréquence du système au Royaume-Uni. Elle a la charge de donner des instructions aux groupes électrogènes pour répondre aux variations de fréquence. Par exemple, lorsque la fréquence chute, les groupes électrogènes augmentent leur puissance de sortie ; lorsque la fréquence augmente, les groupes électrogènes réduisent leur puissance de sortie.

Traditionnellement, les générateurs thermiques peuvent fournir une réponse en fréquence à grande échelle. En règle générale, cela se fait avec des turbines à gaz à cycle ouvert en raison de leur capacité à augmenter et à diminuer la production sur une période relativement courte (certaines en secondes) ainsi qu'à rester au niveau de sortie pendant une période donnée (des minutes ou même des heures). La fermeture des centrales à combustibles fossiles et le déploiement des énergies renouvelables ont réduit la capacité de fournir une réponse de fréquence du côté de l'offre. Dans le même temps, les énergies renouvelables introduisent une demande plus élevée de réponse de fréquence, car elles génèrent de l'électricité à puissance variable. Par conséquent, de nouvelles formes de réponse de fréquence ont été identifiées, notamment l'utilisation de systèmes de stockage d'énergie ainsi que la réponse à la demande (Drax 2017). La réponse de fréquence est obtenue par le National Grid à travers un mélange d'enchères hebdomadaires et mensuelles. Les fournisseurs peuvent aller de groupes électrogènes, de systèmes de stockage et de la réponse agrégée de demande en énergie. Par conséquent, l'idée est que pour équilibrer la fréquence, une intervention doit augmenter ou réduire l'offre ou la demande. Un groupe électrogène peut augmenter la production ; un système de stockage, peut soit augmenter l'offre (en déchargeant son énergie stockée dans le réseau) soit augmenter la demande (en se chargeant) et ; un système agrégé de demande en énergie peut réduire ou augmenter la demande en activant ou en désactivant certaines activités de consommation d'énergie. Si le système agrégé de demande en énergie est en outre connecté à une batterie (stockage d'énergie), il peut alors remplir tous les rôles susmentionnés.

Il existe trois classifications de vitesse de réponse pour la réponse de fréquence dans le système britannique (voir le Tableau 4 ci-dessous). Les fournisseurs peuvent offrir un seul ou une combinaison de différents temps de réponse en fonction de la capacité (vitesse de réponse) de leur technologie.

	Vitesses de réponse	Périodes soutenues
Réponse primaire	Dans les 10 secondes d'un événement	Pendant 20 secondes supplémentaires
Réponse secondaire	Dans les 30 secondes d'un événement	Pendant 30 minutes supplémentaires
Réponse à haute fréquence	Dans les 10 secondes d'un événement	Indéfiniment.

Tableau 4 Trois vitesses de réponse pour la réponse de fréquence



Source : (National Grid ESO 2021a)

Des études antérieures ont montré que la fourniture d'une réponse de fréquence à partir de la réponse à la demande en énergie peut réduire considérablement les coûts d'exploitation du système, atténuer la réduction des énergies renouvelables et réduire les émissions de CO₂ (Aunedi et al. 2013, Teng et al. 2015).

4.3.2 Réponse de fréquence à l'UEA

L'UEA s'est engagée à réduire les impacts environnementaux de ses activités à consommation d'énergie. L'une des activités importantes est l'adoption d'une approche dynamique dans sa gestion de la demande énergétique. Avec l'installation du système de Demande dynamique (DD) exploité par OpenEnergi, l'UEA pourrait fournir une réponse de fréquence en ajustant la consommation d'électricité via les centrales de traitement d'air (AHU ou Air Handling Units en anglais) dans les bâtiments (voir Figure 16).

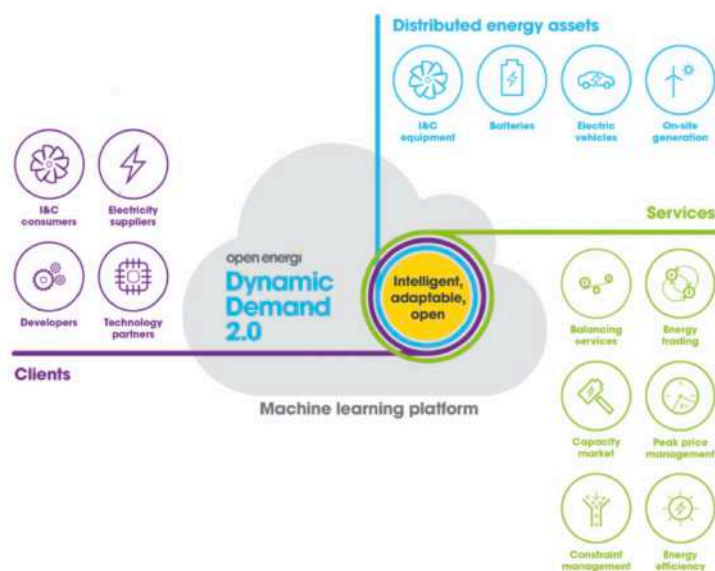


Figure 16 Système de Demande dynamique par Open Energi

Source : (Open Energi 2021)

Le système DD est intégré au système de gestion du bâtiment qui peut être trouvé dans pratiquement tous les types de grands bâtiments. La consommation d'énergie peut être contrôlée automatiquement en réponse aux besoins du système de contrôle de fréquence. Différentes activités qui utilisent de l'énergie peuvent participer à son fonctionnement, y compris le chauffage, le refroidissement et le pompage de l'eau. On pense que le système DD a un énorme potentiel de marché puisque les bâtiments non résidentiels représentent 300 TWh de consommation d'énergie par année.

Grâce à l'agrégation d'actifs énergétiques distribués, le système de demande dynamique fournit une plate-forme qui optimise le fonctionnement du système et crée un ensemble de sources de demande flexibles. Une telle flexibilité peut fournir une série de services de réseau, tels que des services



d'équilibrage, la gestion de la demande de pointe, la réduction de la congestion et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Au Royaume-Uni, la flexibilité de la demande s'est développée rapidement car elle facilite l'intégration des sources d'énergie renouvelables et réduit les coûts du système. Un système énergétique plus flexible pourrait permettre au Royaume-Uni d'économiser jusqu'à 8 milliards £ par an d'ici 2030 et jusqu'à 16 milliards £ par an d'ici 2050 (Committee on Climate Change 2019). D'autre part, les utilisateurs peuvent bénéficier de factures énergétiques réduites (par exemple, grâce à des charges réduites pendant les heures de pointe) et de performances énergétiques améliorées, créant ainsi un système énergétique plus durable.

La plate-forme est développée sur la base de connaissances basées sur des données et une technologie de pointe. Elle fait partie des solutions énergétiques décentralisées qui permettent l'intégration de diverses ressources énergétiques distribuées (RED), telles que la cogénération, la DSR et les mesures d'efficacité énergétique. L'énergie décentralisée joue un rôle important dans la transition énergétique qui, depuis

- La plupart des sources d'énergie décentralisées ont des émissions nulles ou proches de zéro pendant leur fonctionnement, telles que l'éolien, le solaire, la biomasse et la géothermie.
- Les RED sont plus efficaces car elles peuvent fournir plusieurs services énergétiques en même temps. Du fait que les RED sont généralement proches des utilisateurs, elles peuvent également réduire les pertes de transport et de distribution (T&D).
- Les RED peuvent améliorer la fiabilité du réseau local.
- Les RED peuvent réduire les coûts globaux du système en évitant les coûts d'infrastructure de réseau et d'unités de production d'électricité.

L'UEA est la première université à installer un tel système sur son campus. L'ajustement de la consommation d'énergie peut être effectué en allumant et en éteignant ses centrales de traitement d'air (AHU) via les équipements de commande dans chaque bâtiment si National Grid connaît une augmentation de la demande ou une baisse de l'approvisionnement. La charge totale participante est d'environ 700 kW grâce à une combinaison de centrales de traitement d'air et de refroidisseurs. Les CTA sont pilotées pendant une courte durée (quelques minutes). Ainsi, le niveau de confort des utilisateurs n'est pas impacté pendant la période d'utilisation des CTA.

L'activité peut se produire très rapidement, ce qui peut aider le gestionnaire de réseau à maintenir la fréquence du système à 50 Hertz. Martyn Newton, Directeur adjoint du service UEA Estates - Risques et Durabilité, a déclaré que « *la technologie d'Open Energi fournit une réponse plus propre et plus efficace pour équilibrer le réseau que d'augmenter et de diminuer la production d'une centrale électrique. Nous donnons accès à nos charges dans des limites strictement contrôlées et en contrepartie, nous sommes payés* ».

La fourniture de services de réponse de fréquence présente de nombreux avantages. Par exemple, il y a eu un flux de revenus allant jusqu'à 50 000 £ par an sur trois ans entre 2014 et 2017. Cela a également contribué à réduire l'empreinte carbone de l'UEA grâce à une consommation d'énergie réduite. En effet, les émissions liées aux bâtiments représentaient 99 % de l'objectif de réduction des émissions de carbone, principalement via la consommation d'électricité et de chauffage. La fourniture d'une réponse de fréquence via les CTA dans les bâtiments a représenté un pas en avant dans la réduction des émissions liées aux bâtiments de l'UEA. De plus, des services de réponse de fréquence sont nécessaires si le campus devait fonctionner en mode isolé. Lorsqu'il fonctionne en mode isolé, le système doit



équilibrer l'offre et la demande en temps réel. Les technologies conventionnelles du côté de l'offre telles que les centrales de cogénération étaient utilisées pour s'adapter aux variations de la demande. Cependant, l'intégration des sources d'énergie renouvelables a rendu l'offre moins flexible dans la fourniture de ces services. Par conséquent, les services de réponse de fréquence fournis par les CTA à l'UEA offrent une importante alternative décarbonisée pour gérer la fréquence du système lorsqu'il fonctionne en mode isolé.

4.4 Autres interventions mises en œuvre et envisagées à l'UEA

Outre les interventions mises en œuvre ci-dessus, l'UEA a également envisagé d'autres mesures pour réduire sa consommation d'énergie et les émissions de CO₂ associées. Par exemple, l'UEA a participé au marché de capacité et a envisagé la fourniture de réserves d'exploitation à court terme entre 2017 et 2019, en utilisant ses technologies énergétiques à faibles émissions de carbone. Cette sous-section comprend une introduction générale des deux services et une explication sur les avantages de fournir ces services à l'UEA.

Marché de capacité

Les arguments théoriques généraux en faveur des marchés de capacité reflètent le scepticisme quant à savoir si des marchés concurrentiels exclusivement axés sur l'énergie fourniront une électricité de haute qualité, à un prix abordable avec des émissions minimales, voire nulles. D'autant plus que cela doit se faire d'une manière qui permette d'amortir les coûts fixes de l'investissement.

Pour faire face au problème d'adéquation des ressources, le Royaume-Uni a initialement utilisé un Fonds de réserve d'urgence (CBR ou Contingency Balance Reserve en anglais), géré par la National Grid Company (NGC), fournissant une réserve supplémentaire au milieu de la décennie. Cette réserve était un produit de transition et il a été utilisé pour la dernière fois en 2016. Il a été remplacé par un marché de capacité pour la Grande-Bretagne (GB) afin de répondre aux préoccupations concernant l'adéquation des ressources. Le marché de la capacité pour la Grande-Bretagne est organisé comme une enchère (décroissante) qui inclut toutes les technologies qui ne reçoivent pas de subventions, avec tous les gagnants recevant le prix marginal pour la durée de leur contrat, qui est généralement d'un an. Les enchères de capacité sont organisées lorsque le gouvernement considère qu'il y a un besoin ; quatre ans avant la livraison (T-4) et 1 an avant la livraison (T-1). Jusqu'à cette année, les marchés de capacité s'équilibrent bien en deçà de 20 £/kW/an, reflétant une marge de réserve saine, comme l'illustre la Figure 17. Il y a eu deux développements particulièrement notables. L'un était la baisse de la part des accords de capacité attribués aux centrales électriques existantes, y compris les centrales au charbon, nucléaires et à cycle combiné par turbine à gaz (CCGT). L'autre était l'importance croissante des attributions de capacité pour les options technologiques telles que les turbines à gaz à cycle ouvert, la production d'énergie renouvelable, les interconnexions et la réponse à la demande.





Figure 17 Prix de compensation au T-4 du marché de capacité britannique

Source : (Cornwall Insight 2021)

En 2017, l'UEA a signé un contrat avec KiWi Power pour la fourniture de services relatifs au marché de capacité entre octobre 2018 et septembre 2019. L'UEA a accepté de mettre de la capacité à disposition de KiWi Power pour la production existante au T-1. La capacité disponible sera utilisée pour réduire la demande sur le réseau pendant les périodes de pointe de demande. Elle était tenue de fournir un service complet dans les 4 heures suivant l'instruction et de maintenir la fourniture pendant toute la durée de l'événement (jusqu'à 4 heures). Les revenus annuels attendus de la participation au marché de capacité étaient de 6 950 £ par MW.

STOR – Réserve d'exploitation à court terme (ou Short Term Operating Reserve en anglais)

L'exploitation du système électrique nécessite un équilibrage en temps réel entre l'offre et la demande. Traditionnellement, l'offre est ajustée à la hausse ou à la baisse pour répondre à l'évolution de la demande qui est largement prévisible. Parfois, la demande réelle est supérieure à la demande prévue, une réserve d'exploitation à court terme est alors nécessaire en augmentant la production ou en réduisant la demande. STOR fait partie des services d'équilibrage globaux au Royaume-Uni. Le service STOR peut être fourni par une seule unité d'offre/demande ou sous une forme agrégée qui comprend plus d'un site. Ses exigences techniques les plus récentes incluent :

- Une production minimale de 3 MW ou une réduction constante de la demande équivalente.
- Un temps de réponse dans les 20 minutes.
- Une durée de réponse minimale de 2 heures.
- Dans les 1 200 minutes (20 heures) suivant la récupération, doit à nouveau pouvoir fournir une réponse.



L'UEA a envisagé la fourniture du service STOR dans le cadre de collaborations avec une société de services énergétiques en 2017. Le revenu annuel attendu s'élevait à 25 000 £ par MW disponible. Les revenus attendus proviennent des paiements de disponibilité et d'utilisation. L'UEA doit fournir des services pour jusqu'à 10 événements par an. La durée prévue de chaque événement est de 2 heures avec un préavis minimum de 20 minutes pour les événements.

4.5 Conclusions

L'abandon des combustibles fossiles et la pénétration croissante des sources d'énergie renouvelables ont conduit à une modification de la structure de l'offre et, par conséquent, à la capacité de fournir des services flexibles du côté de l'offre au système électrique. Des sources alternatives doivent être puisées du côté demande d'énergie ; ce qui a été largement négligé dans le mode d'exploitation traditionnel du système électrique.

Le projet ICE a lancé le pilote d'une approche rentable de la gestion de la consommation d'énergie sur le campus de l'UEA. Le système de chauffage intelligent comprend des composants qui permettent une utilisation optimisée du chauffage, notamment des vannes de radiateur thermostatiques programmables, des systèmes de contrôle par zone, des contrôleurs centraux et une interface sans fil. De telles solutions technologiques ne nécessitent pas de remplacer les systèmes existants, mais de moderniser les systèmes existants avec des fonctions permettant une meilleure interactivité avec les utilisateurs. De multiples activités d'engagement des utilisateurs ont été organisées pour recueillir les expériences des utilisateurs, aspect essentiel au succès des solutions technologiques.

Un autre aspect clé de la solution côté demande d'énergie de l'UEA est l'adoption de la réponse de fréquence. Grâce au contrôle des CTA dans les bâtiments universitaires, la demande de puissance dans ces bâtiments est réduite pendant une courte période. Sans compromettre le confort des utilisateurs, il fournit des services de fréquence au Réseau National. De tels services peuvent être utiles à l'UEA lorsque son système électrique fonctionne en mode isolé.

En effet, la mise en œuvre à grande échelle du système de chauffage intelligent peut fournir une opportunité significative pour l'UEA de mieux explorer le potentiel de fourniture de services FR à l'avenir. De façon similaire au contrôle des CTA dans les bâtiments universitaires, le système de chauffage intelligent peut mieux gérer la consommation de chauffage à différentes échelles de temps (par exemple grâce à des configurations plus granulaires au moment de l'utilisation). Sans compromettre le confort de l'utilisateur, le système de chauffage intelligent peut être utile pour gérer la demande, qui peut être une source importante du côté demande d'énergie, lorsqu'il est exploité de manière agrégée. Un tel arrangement peut même devenir nécessaire lorsque le chauffage sera électrifié par l'adoption de pompes à chaleur à l'avenir. De nouvelles opportunités apparaîtront également puisque le système électrique nécessitera un niveau de flexibilité plus élevé qui rendra plus d'actualité une étude détaillée de l'option de stockage de l'énergie électrique (Li et al. 2018, Li et al. 2019).



4.6 Références

- Aunedi, M., P. Kountouriotis, J. E. O. Calderon, D. Angeli and G. Strbac (2013). "Economic and Environmental Benefits of Dynamic Demand in Providing Frequency Regulation." IEEE Transactions on Smart Grid **4**(4): 2036-2048.
- Behrangrad, M. (2015). "A review of demand side management business models in the electricity market." Renewable and Sustainable Energy Reviews **47**: 270-283.
- BEIS (2020). UK energy in brief 2020, Department for Business, Energy & Industrial Strategy
- Chandler, H. (2011). *Harnessing Variable Renewables: A Guide to the Balancing Challenge*, International Energy Agency.
- Committee on Climate Change (2019). *Net Zero - Technical Annex Integrating variable renewables into the UK electricity system*.
- Cornwall Insight (2021). *Energy Spectrum. Issue 754*.
- Drax. (2017). "Why we need the whole country on the same frequency." Retrieved 23 July, 2021, from <https://www.drax.com/power-generation/need-whole-country-frequency/>.
- Drax (2020). *Electric Insights Quarterly: Q2 2020*.
- Eto, J. (1996). *The Past, Present, and Future of U.S. Utility Demand-Side Management Programs*. Berkeley, California, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Ganandran, G. S. B., T. M. I. Mahlia, H. C. Ong, B. Rismanchi and W. T. Chong (2014). "Cost-benefit analysis and emission reduction of energy efficient lighting at the Universiti Tenaga Nasional." TheScientificWorldJournal **2014**: 745894-745894.
- Gelazanskas, L. and K. A. A. Gamage (2014). "Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction." Sustainable Cities and Society **11**: 22-30.
- Gellings, C. W. (1985). "The concept of demand-side management for electric utilities." Proceedings of the IEEE **73**(10): 1468-1470.
- Gellings, C. W. and K. Parmenter (2017). *Demand-Side Management. Energy Management and Conservation Handbook*. F. Kreith and D. Goswami. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Grubb, M. and D. Newbery (2018). *UK Electricity Market Reform and the Energy Transition: Emerging Lessons. EPRG Working Paper 1817*, University of Cambridge, Energy Policy Research Group.
- Kamat, A. S., R. Khosla and V. Narayanamurti (2020). "Illuminating homes with LEDs in India: Rapid market creation towards low-carbon technology transition in a developing country." Energy Research & Social Science **66**: 101488.
- Li, X., K. J. Chalvatzis and P. Stephanides (2018). "Innovative Energy Islands: Life-Cycle Cost-Benefit Analysis for Battery Energy Storage." Sustainability **10**(10): 3371.
- Li, X., K. J. Chalvatzis, P. Stephanides, C. Papapostolou, E. Kondyli, K. Kaldellis and D. Zafirakis (2019). "Bringing innovation to market: business models for battery storage." Energy Procedia **159**: 327-332.
- National Grid ESO. (2021a). "Firm frequency response (FFR)." Retrieved 23 July, 2021, from <https://www.nationalgrideso.com/industry-information/balancing-services/frequency-response-services/firm-frequency-response-ffr>.



National Grid ESO. (2021b). "Frequency response services." Retrieved 23 July, 2021, from <https://www.nationalgrideso.com/industry-information/balancing-services/frequency-response-services>.

Open Energi. (2021). "Dynamic Demand 2.0." Retrieved 23 July, 2021, from <https://openenergi.com/technology>.

Pollitt, M., C. Yang and H. Chen (2017). Reforming the Chinese Electricity Supply Sector: Lessons from International Experience

Strbac, G. (2008). "Demand side management: Benefits and challenges." *Energy Policy* **36**(12): 4419-4426.

Teng, F., M. Aunedi, D. Pudjianto and G. Strbac (2015). "Benefits of Demand-Side Response in Providing Frequency Response Service in the Future GB Power System." *Frontiers in Energy Research* **3**: 36.



5 Apprentissage mutuel entre l'UEA et Ouessant

L'apprentissage mutuel et le renforcement des capacités sont également des éléments clés de ce livrable. Les leçons apprises à l'UEA peuvent fournir des connaissances sur les applications des réseaux intelligents à Ouessant ; tandis que l'application à Ouessant peut offrir des informations précieuses à l'UEA sur le fonctionnement de son réseau en mode isolé. Cette section présente les principaux points à retenir des deux études de cas et examine la possibilité de résultats transférables entre elles.

5.1 Résultats transférables du projet d'Ouessant

Ouessant, en tant qu'île non interconnectée, est confrontée à des défis en matière de sécurité d'approvisionnement énergétique (Ioannidis and Chalvatzis 2017, Ioannidis et al. 2019). Ces défis ne se limitent pas à l'approvisionnement énergétique mais peuvent également s'étendre aux émissions polluantes. Ils peuvent être traités par des moyens technologiques et organisationnels (Spyropoulos et al. 2005, Hills et al. 2018). Ouessant a su démontrer l'adoption de technologies intelligentes qui permettent de mieux gérer la consommation d'énergie afin de parvenir à un fonctionnement du réseau en mode isolé. Ces technologies comprennent l'application d'un système de gestion de l'énergie (SGE), l'exploitation d'une hydrolienne avec un système de stockage par batterie, l'adoption de compteurs intelligents et d'un système d'automatisation.

Un SGE est utilisé pour maintenir la stabilité du système tout en maximisant l'intégration des sources d'énergie renouvelables à Ouessant. De multiples technologies énergétiques peuvent être intégrées au système, notamment des centrales thermiques conventionnelles, des systèmes de stockage, des ressources côté demande d'énergie ainsi que des technologies d'énergie renouvelable, qui sont étroitement surveillées par le SGE. L'un des composants clés gérés par le SGE est un système de stockage par batterie lithium-ion. L'électricité produite par diverses technologies renouvelables peut être stockée dans le système de batterie en cas de production excessive. Les batteries peuvent être déchargées lorsque la génération est faible. Ce composant est particulièrement utile pour gérer la production d'électricité à partir d'hydroliennes qui ont généralement des rendements variables à différentes tranches horaires. Le système de batteries est utilisé comme source flexible pour lisser les sorties de puissance. La combinaison du stockage d'énergie par batterie et des énergies renouvelables peut être appliquée à de nombreuses installations (y compris le campus de l'UEA), voire des sites industriels (Zafirakis et al. 2014) et elle peut fournir une qualité d'énergie sans avoir recours à l'utilisation de combustibles fossiles nécessaires par d'autres combinaisons technologiques (Zafirakis and Chalvatzis 2014). Ouessant a également inclus des mesures du côté demande d'énergie pour gérer le système électrique. Par exemple, un tarif en fonction de l'horaire (ToU) a été adopté pour déplacer la consommation des heures de pointe vers les heures creuses. L'installation de compteurs intelligents permet une désagrégation supplémentaire des heures creuses, ce qui évite une augmentation de la demande lorsque les heures creuses commencent. Le système propose également un tarif suivi de production d'énergie renouvelable qui permet la coordination entre la production et la consommation d'énergie marémotrice. Des signaux seront envoyés une fois que l'hydrolienne sera en service. Le système énergétique d'Ouessant a également inclus des pilotes sur le contrôle automatique des équipements grâce à des compteurs intelligents. Une plateforme centrale est établie pour faciliter les communications sans fil entre le SGE et les divers équipements. La charge agrégée peut fournir des sources flexibles au système d'alimentation, ce qui est important pour la sécurité de l'approvisionnement en électricité.



Outre les solutions technologiques, le projet ICE comprend diverses activités d'engagement des consommateurs qui sont documentées en matière de défis, en particulier avec les populations des territoires éloignés (Kallis et al. 2021). Ces activités comprennent la diffusion d'informations liées à la consommation d'énergie, l'introduction du contexte énergétique local et la présentation de la gestion de l'énergie domestique. L'équipe du projet a fourni trois types d'informations qui permettent de révéler différents niveaux d'informations (allant d'informations générales faciles à comprendre aux informations détaillées avec des graphiques et des chiffres). Cela permet aux consommateurs ayant différents niveaux de volonté de participer au programme de disposer d'informations pertinentes.

Certaines des technologies adoptées et des activités d'engagement à Ouessant sont également en cours sur le campus de l'UEA. Par exemple, UEA utilise des systèmes de gestion de l'énergie qui coordonnent le fonctionnement de différentes technologies, ce qui permet une intégration optimisée de ses technologies à faible émission de carbone. En outre, l'UEA a également mis en œuvre plusieurs activités d'engagement des utilisateurs (y compris des activités d'engagement avec des étudiants du projet ICE). Celles-ci sont présentées dans la Section 3.

Néanmoins, l'adoption d'un système de stockage par batterie en combinaison avec l'exploitation du système d'énergie marémotrice peut être utile au développement des RED à l'UEA. Un concept similaire a été utilisé à l'UEA, illustré par l'adoption de centrales de cogénération et de chaudières en combinaison avec le système de stockage thermique. Avec l'expansion continue de sa capacité solaire photovoltaïque, l'UEA a envisagé l'installation d'un système de stockage par batterie.

Une autre leçon utile est l'application de l'automatisation, qui permet de contrôler l'équipement à distance. L'UEA a un grand nombre de logements étudiants qui ne sont pas mesurés individuellement. Les étudiants ne paient pas leurs factures d'énergie, qui sont souvent incluses dans le prix total de leur loyer, et manquent donc de motivation pour participer à des programmes liés à la demande d'un point de vue économique. L'automatisation axée sur les données offre une solution qui permet de tirer parti du potentiel de participation à grande échelle des étudiants. Une attention particulière doit également être accordée à la collecte de données à grande échelle sur le micro-réseau du campus et à leur utilisation intelligente pour la prise de décision dans un cadre de fréquence élevée (Chalvatzis et al. 2019).

L'Université s'est engagée à atteindre un niveau Net Zéro d'émissions de carbone d'ici 2045. Cela peut avoir des implications importantes pour les stratégies énergétiques de l'UEA. Un changement notable dans le futur plan de fourniture d'énergie de l'UEA est l'idée de passer d'un système énergétique indépendant à un système plus connecté au réseau tout en conservant la capacité de faire les deux dans des conditions appropriées. Bien que cela puisse offrir une grande sécurité d'approvisionnement, toute une série de considérations devront être incluses dans la prise de décision pour garantir que les améliorations sont réalisables et en phase avec d'autres objectifs (Vafadarnikjoo et al. 2021). Cela est dû aux variations récentes dans le mélange de sources électriques au niveau national, qui montre une forte baisse de l'électricité au charbon et une croissance rapide des sources d'énergie renouvelables. Malgré le rôle important du gaz dans le mélange de sources électriques existant, le gouvernement britannique s'est engagé à décarboniser l'électricité d'ici 2035 ; et les mesures d'innovation passées et à venir devraient permettre de faciliter cette approche (Pitelis et al. 2020). Les technologies renouvelables et à faible émission de carbone telles que l'éolien offshore et l'énergie nucléaire joueront un rôle



important dans le remplacement des combustibles fossiles. En outre, l'électrification du chauffage et de la mobilité peut entraîner une augmentation significative de la consommation électrique, à la fois au niveau national et sur le campus de l'UEA. Par conséquent, l'UEA envisage d'augmenter les importations du réseau à l'avenir, une décision qui présente plusieurs défis en soi. Alors que le réseau est généralement en cours de décarbonisation, un gros consommateur d'énergie, comme le campus de l'UEA, doit examiner attentivement les fournisseurs d'électricité disponibles et s'assurer de sélectionner le plus approprié, pour leurs innovations, plutôt que leur image de marque sur les références de durabilité. (Rutter et al. 2018). L'automatisation peut toujours être une solution importante pour le système énergétique de l'UEA à l'avenir, lorsque la majeure partie de sa consommation de chauffage sera électrifiée. De façon similaire au contrôle des CTA pour la fourniture de services FC, la technologie d'automatisation peut constituer une source de flexibilité importante du côté demande d'énergie, sans compromettre le confort de l'utilisateur.

5.2 Résultats transférables de l'UEA

Les Sections 2 et 3 de ce livrable présentent le système d'énergie à faible émission de carbone adopté à l'UEA. Le système énergétique peut fournir des leçons à Ouessant sur la construction d'un système énergétique intégré qui permet d'optimiser la performance énergétique. De toute évidence, compte tenu des différences d'échelle et du fait que le réseau de l'UEA est connecté alors que Ouessant ne l'est pas, tout n'est pas directement applicable.

Dans un premier temps, la mise à niveau des nouvelles technologies énergétiques, même en s'appuyant sur des combustibles fossiles, y compris de nouvelles unités à gaz et des systèmes de stockage thermique, peut améliorer l'efficacité énergétique globale, si elles remplacent d'anciens systèmes inefficaces. Outre une meilleure efficacité opérationnelle, les technologies à faible émission de carbone sont intégrées les unes aux autres. À titre d'exemple, la centrale de cogénération et les chaudières à gaz atteignent leur efficacité de fonctionnement optimale grâce à l'installation d'un système de stockage thermique. Le système de stockage thermique stocke la production de chaleur excessive pour une utilisation ultérieure via les systèmes de chauffage et de refroidissement urbains, et sont donc un exemple de meilleure utilisation des ressources. Les solutions descendantes sont mieux coordonnées avec les approches ascendantes qui s'appuient sur une communication efficace avec le personnel et les étudiants. Une telle activité d'engagement se concentre sur la demande en modifiant le comportement de consommation ainsi qu'en contrôlant de façon automatique les services de chauffage et de refroidissement. Sans compromettre le confort des utilisateurs, ces mesures réduisent efficacement la consommation d'énergie et les impacts environnementaux associés. La Section 3 présente deux exemples, à savoir le système de chauffage intelligent dans les bâtiments résidentiels de l'UEA et l'adoption du système de demande dynamique. En outre, un autre élément de réseau intelligent qui peut être envisagé pour Ouessant et avec lequel l'UEA a de l'expérience est le système de réponse de fréquence. Bien que la principale application de la réponse de fréquence reste de permettre des services pour le réseau en dehors de l'entité qui l'exploite et qu'elle nécessite donc une connectivité au réseau, elle offre des éléments utiles même en mode isolé. Par conséquent, au lieu de fournir des services pour le réseau externe, il est possible de fournir des services pour le micro-réseau interne. La France a un secteur électrique à relativement faible émission de carbone, contrairement à d'autres pays européens qui ont entamé leur décarbonisation à partir d'une base très polluante (Kaldellis et al. 2004, Chalvatzis 2009), et ses îles sont des études de cas de décarbonisation intéressantes, contrairement à d'autres pays européens. Essentiellement, la réponse de fréquence est un type de système de



gestion de la demande qui, si correctement conçu, peut fournir une réponse rapide, nettement plus rapide que toute autre technologie similaire. En tant que tels, ses services peuvent être précieux dans n'importe quel contexte où un équilibre est requis ; et les micro-réseaux ont normalement ce besoin.

5.3 Conclusions

La transition énergétique à faible émission de carbone à l'UEA et à Ouessant peut favoriser les apprentissages mutuels. L'UEA peut apprendre d'Ouessant sur l'application du système de stockage par batterie en combinaison avec les technologies d'énergie renouvelable. En outre, des mesures du côté demande d'énergie, telles que l'automatisation, peuvent également offrir l'opportunité de sources plus flexibles côté demande, si la démonstration du système de chauffage intelligent peut être étendue à un grand nombre de dortoirs à l'avenir dans l'UEA. Pour Ouessant, des leçons peuvent être tirées de la construction d'un système énergétique intégré qui optimise la performance énergétique à l'UEA ainsi que le potentiel d'utilisation de systèmes de réponse de fréquence là où cela est viable.

5.4 Références

- Chalvatzis, K. J. (2009). "Electricity generation development of Eastern Europe: A carbon technology management case study for Poland." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**(6): 1606-1612.
- Chalvatzis, K. J., H. Malekpoor, N. Mishra, F. Lettice and S. Choudhary (2019). "Sustainable resource allocation for power generation: The role of big data in enabling interindustry architectural innovation." *Technological Forecasting and Social Change* **144**: 381-393.
- Hills, J. M., E. Michalena and K. J. Chalvatzis (2018). "Innovative technology in the Pacific: Building resilience for vulnerable communities." *Technological Forecasting and Social Change* **129**: 16-26.
- Ioannidis, A. and K. J. Chalvatzis (2017). "Energy Supply Sustainability For Island Nations: A Study on 8 Global Islands." *Energy Procedia* **142**: 3028-3034.
- Ioannidis, A., K. J. Chalvatzis, X. Li, G. Notton and P. Stephanides (2019). "The case for islands' energy vulnerability: Electricity supply diversity in 44 global islands." *Renewable Energy* **143**: 440-452.
- Kaldellis, J., G. Spyropoulos and K. Chalvatzis (2004). "The Impact of Greek Electricity Generation Sector on the National Air Pollution Problem." *Fresenius Environmental Bulletin* **13**: 647-656.
- Kallis, G., P. Stephanides, E. Bailey, P. Devine-Wright, K. Chalvatzis and I. Bailey (2021). "The challenges of engaging island communities: Lessons on renewable energy from a review of 17 case studies." *Energy Research & Social Science* **81**: 102257.
- Pitelis, A., N. Vasilakos and K. Chalvatzis (2020). "Fostering innovation in renewable energy technologies: Choice of policy instruments and effectiveness." *Renewable Energy* **151**: 1163-1172.
- Rutter, R., K. J. Chalvatzis, S. Roper and F. Lettice (2018). "Branding Instead of Product Innovation: A Study on the Brand Personalities of the UK's Electricity Market." *European Management Review* **15**(2): 255-272.
- Spyropoulos, G., K. Chalvatzis, A. Paliatsos and J. Kaldellis (2005). *Sulphur Dioxide Emissions Due to Electricity Generation in the Aegean Islands: Real Threat or Overestimated Danger?*



Vafadarnikjoo, A., M. Tavana, K. Chalvatzis and T. Botelho (2021). "A socio-economic and environmental vulnerability assessment model with causal relationships in electric power supply chains." Socio-Economic Planning Sciences: 101156.

Zafirakis, D. and K. J. Chalvatzis (2014). "Wind energy and natural gas-based energy storage to promote energy security and lower emissions in island regions." Fuel **115**: 203-219.

Zafirakis, D., C. Elmasides, D. U. Sauer, M. Leuthold, G. Merei, J. K. Kaldellis, G. Vokas and K. J. Chalvatzis (2014). "The Multiple Role of Energy Storage in the Industrial Sector: Evidence from a Greek Industrial Facility." Energy Procedia **46**: 178-185.



BRETAGNE
DÉVELOPPEMENT
INNOVATION



6 Conclusions

L'UEA a, ces dernières années, adopté un certain nombre de technologies énergétiques à faible émission de carbone en vue d'améliorer ses performances environnementales et énergétiques. Du côté de l'approvisionnement, l'UEA a investi dans des systèmes solaires photovoltaïques, installé et modernisé des unités de cogénération au gaz, modernisé trois chaudières à gaz et installé un système de stockage thermique. Les applications de technologies énergétiques à faible émission de carbone ont efficacement permis de réduire les émissions de CO₂ sur le campus de l'UEA. De plus, cela a permis de réaliser des économies sur les coûts énergétiques grâce à des améliorations en matière d'efficacité énergétique. Du côté de la demande en énergie, l'UEA a adopté de nouvelles technologies pour réduire la consommation d'énergie dans ses bâtiments, telles que l'adoption de la technologie TermoDeck et la mise à niveau de l'éclairage avec des ampoules à DEL dans ses bâtiments universitaires. Les technologies énergétiques à faible émission de carbone sont intégrées ensemble pour obtenir des performances optimales, ce qui entraîne une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de carbone associées. À titre d'exemple, la centrale de cogénération et les chaudières à gaz atteignent leur efficacité de fonctionnement optimale grâce à leur combinaison avec les systèmes de stockage d'énergie thermique. Les systèmes de chauffage et de refroidissement urbains sont utilisés pour obtenir une meilleure utilisation des ressources. Outre les solutions du côté de l'offre, l'UEA s'est activement engagée avec le personnel et les étudiants afin d'explorer les possibilités d'améliorer davantage les performances énergétiques en utilisant une approche axée sur les consommateurs d'énergie.

Le futur plan énergétique de l'UEA est guidé par l'engagement de devenir un campus Net Zéro émissions de carbone zéro d'ici 2045, conduisant à une transition vers des systèmes sans combustibles fossiles et à une augmentation de la production d'énergie renouvelable à l'avenir. Au niveau national, ces changements ont conduit à une modification de la structure de l'offre et, par conséquent, à la capacité de fournir des services flexibles du côté de l'offre au système électrique. De façon similaire, ces changements peuvent également avoir des impacts significatifs sur la fourniture d'énergie à l'UEA. Outre les systèmes de stockage d'énergie (tels que les batteries), des sources alternatives doivent être puisées du côté demande d'énergie ; ce qui a été largement négligé dans le mode d'exploitation traditionnel du système électrique.

Bien qu'il s'agisse d'une démonstration à petite échelle, le projet ICE a fourni une approche rentable de la gestion de la consommation d'énergie sur le campus de l'UEA. Le système de chauffage intelligent comprend des composants qui permettent une utilisation optimisée du chauffage, notamment des vannes de radiateur thermostatiques programmables, des systèmes de contrôle par zone, des contrôleurs centraux et une interface sans fil. De telles solutions technologiques ne nécessitent pas de remplacer l'infrastructure existante, mais de moderniser les systèmes existants avec des fonctions permettant une meilleure interactivité avec les utilisateurs. De multiples activités d'engagement des utilisateurs ont été organisées pour recueillir les expériences des utilisateurs, aspect essentiel au succès des solutions technologiques. Un autre aspect clé de la solution côté demande d'énergie de l'UEA est l'adoption de la réponse de fréquence. Grâce au contrôle des CTA dans les bâtiments universitaires, la demande d'énergie dans ces bâtiments est réduite rapidement mais seulement pour une courte période. Sans compromettre le confort des utilisateurs, il fournit des services de fréquence au Réseau



BRETAGNE
DÉVELOPPEMENT
INNOVATION



RES MERSA
BREST-IRRISE

Technopole
Quimper-Corbouille



UNIVERSITY OF
EXETER

PLYMOUTH
UNIVERSITY

UEA
University of Exeter

marine

National. De tels services sont également nécessaires pour l'UEA lorsque son système électrique fonctionne en mode isolé.

En effet, la mise en œuvre à grande échelle du système de chauffage intelligent peut fournir une opportunité significative pour l'UEA de mieux explorer le potentiel de fourniture de services FR à l'avenir. De façon similaire au contrôle des CTA dans les bâtiments universitaires, le système de chauffage intelligent peut mieux gérer la consommation de chauffage à différentes échelles de temps (par exemple grâce à des configurations plus granulaires au moment de l'utilisation ou grâce à la technologie d'automatisation). Sans compromettre le confort de l'utilisateur, le système de chauffage intelligent peut être utile pour gérer la demande, qui peut être une source de flexibilité importante du côté demande d'énergie, lorsqu'il est exploité de manière agrégée. Un tel arrangement peut même devenir nécessaire lorsque le chauffage sera électrifié par l'adoption de pompes à chaleur à l'avenir. De nouvelles opportunités commerciales peuvent également émerger car le système électrique nécessitera un niveau de flexibilité plus élevé.

Enfin et surtout, la transition énergétique à faible émission de carbone à l'UEA et à Ouessant peut favoriser les apprentissages mutuels. L'UEA peut apprendre d'Ouessant sur l'application du système de stockage par batterie en combinaison avec les technologies d'énergie renouvelable. En outre, des mesures du côté demande d'énergie, telles que l'automatisation, peuvent également offrir l'opportunité de sources plus flexibles côté demande, si la démonstration du système de chauffage intelligent peut être étendue à un grand nombre de dortoirs à l'avenir dans l'UEA. Pour Ouessant, des leçons peuvent être tirées de la construction d'un système énergétique intégré qui optimise la performance énergétique à l'UEA ainsi que le potentiel d'utilisation de systèmes de réponse de fréquence là où cela est viable.



BRETAGNE
DÉVELOPPEMENT
INNOVATION



RESERVOIR
BREST-IRROISE

Technopole
Quimper-Corouaillé

POLE MER
RECHERCHES EN MER ET EN MERIS

UNIVERSITY OF
EXETER

PLYMOUTH
UNIVERSITY

UEA
University of Exeter

marine

Annexe I : Supports de l'exposition en français et en anglais

Pour rappel la date du BAT étant fixé au 24 août, merci de signer au plus vite ce BAT.

Tous les logos sont en HD, l'aperçu du pdf donne une version pixellisée qui n'apparaît pas à l'impression.

BAT Exposition mobile les paravents - français et anglais V5 - 29 août 2018

- p.2 introduction
- p.4 mobilité
- p.6 habitat
- p.8 énergie
- p.10 Ouessant



BRETAGNE
DÉVELOPPEMENT
INNOVATION



LES MUSEES
BREST-IRROISE

Technopole
Quimper-Corbouille



UNIVERSITY OF
EXETER

PLYMOUTH
UNIVERSITY

UEA
University of Exeter

marine

introduction - version EN

energy transition, why?

- Energy dependence
- Renewable energy
- Decision of local decision
- Energy efficiency problems
- Fuel poverty
- Pressure to greenhouse gases due to human activity

energy transition

The energy transition requires us not to lose sight of the social and human aspects.

- habitat
- mobility
- energy management

energy transition, how?

- Consumption?
- Consumption level?
- Production level?
- Production?

energy users

The play an important role in the energy transition. In the context of the European Union, the State, the Region, the Department, the City, the Municipality, the Energy Company, the Citizen, the Consumer, the Producer, the Investor, the Energy User.

energy producers

The play a key role in the energy transition. In the context of the European Union, the State, the Region, the Department, the City, the Municipality, the Energy Company, the Citizen, the Consumer, the Producer, the Investor, the Energy User.

energy consumers

The play a key role in the energy transition. In the context of the European Union, the State, the Region, the Department, the City, the Municipality, the Energy Company, the Citizen, the Consumer, the Producer, the Investor, the Energy User.

energy investors

The play a key role in the energy transition. In the context of the European Union, the State, the Region, the Department, the City, the Municipality, the Energy Company, the Citizen, the Consumer, the Producer, the Investor, the Energy User.

let's all play a part in our energy future

mobilité - version FR

la mobilité durable

Ensemble de solutions visant à diminuer la pollution liée aux déplacements, tout en permettant un accès de vie et de loisirs pour agir.

- Le transport de personnes
- Le transport de marchandises
- La recherche et les nouvelles technologies
- L'emploi
- L'investissement de territoire

la mobilité aujourd'hui

Part des transports dans la consommation globale d'énergie finale en Bretagne.

Repartition des énergies utilisées dans les transports. La quasi totalité de nos énergies provient des gaz à effet de serre.

polluant, non-polluant, non-polluant

La transition énergétique

mobilité - version EN

How about we move around better?

Transport's share in total consumption of final energy in Brittany

mobility today

Distribution of the energy used in transport: About 45% of these energies produce greenhouse gases.

sustainable mobility

Set of solutions to reduce transport-related pollution, while ensuring the quality of life and safety each person can act.

passenger transport

freight transport

improving the technologies

equipment

land use planning

non-polluting energy

polluting energy

Plan of the game

habitat - version FR

Cherchez la concentration d'énergie à l'échelle de un territoire ?

Les principales formes de concentration d'énergie dans l'habitat

l'urbanisme aujourd'hui

Plan de l'habitat dans la consommation totale d'énergie finale en Bretagne

Rapport de logement individuel / collectif

Echelle de logement en Bretagne

l'urbanisme durable

habitat

déplacement

énergie

équipement

usage industriel et commercial

usage non bâti

non-polluting energy

polluting energy

Plan de l'habitat

Reducing energy consumption in a regional scale?

The main energy consumption points in the home

Habitats share in global consumption of final energy in Britain

urbanism today

- Report on individual / collective buildings
- Building classification rules

sustainable urbanism

- Habitat:
 - street
 - management
 - of space
- Living together
- Industry and commercial zones
- Open spaces

Global climate change is a major energy-related issue and requires the building sector to contribute to energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions to reduce the level of energy-related greenhouse gas emissions. Improving the quality of the environment. The challenge is to provide a high quality environment for living and working spaces, a high level of energy efficiency, a high level of energy efficiency and a high level of energy efficiency. A high level of energy efficiency and a high level of energy efficiency. A high level of energy efficiency and a high level of energy efficiency.

Energies renouvelables ? Réseaux intelligents ?

l'énergie optimisée

- développer Les énergies renouvelables
- maîtriser la consommation
- stocker l'énergie
- adapter production et consommation
- Lier les pacts

La recherche et l'innovation Les réseaux intelligents

une gestion optimisée

- stockage
- production
- réseaux intelligents
- énergie
- réseaux intelligents

produire demain, des exemples

- Les énergies marines
- des technologies à développer...
- osmo
- évaporation
- biomasse marine

energy today

optimised energy

- developing renewable energy
- managing consumption
- storing energy
- research and innovation
- smart grids
- adapting production and consumption
- limiting losses

optimised management

- storage
- smart grids
- smart grids
- smart grids
- smart grids

producing tomorrow, examples

- hydrogen
- evaporation
- marine biomass

technologies to be developed...

Let's all play a part in our energy future

ouessant

A vous ! Proposer les engagements et les dispositions nécessaires pour assurer l'autonomie énergétique de l'île d'Ouessant dans l'optique de la transition énergétique.

Over to you! Suggest arrangements and measures needed to achieve energy independence on the island of Ouessant, in the spirit of the energy transition.

tous acteurs de notre futur énergétique