



Interreg



France (Channel Manche) England

LIVRABLE ICE L3.1.1
CONCEPTION D'INTERVENTIONS
ET DE SOLUTIONS TECHNIQUES

xx/xx/xx





Rapport ICE L3.1.1

Conception d'interventions et de solutions techniques pour des systèmes énergétiques isolés

Syndicat départemental d'énergie et d'équipement du Finistère, Keynergie, Association des Iles du Ponant, Université de Plymouth, Université d'Exeter, Université d'East Anglia, Pôle Mer Bretagne Atlantique, Technopôle Brest Iroise





BRETAGNE
DÉVELOPPEMENT
INNOVATION



PLYMOUTH
UNIVERSITY

UEA
UNIVERSITY OF EAST ANGLIA



A propos de ICE

Soutenu par le programme Interreg VA France (Manche) Angleterre, le projet Intelligent Community Energy (ICE) a pour objectif de dessiner et appliquer des solutions innovantes d'énergie intelligente pour les territoires isolés de la Manche. Les îles et les territoires périphériques font face à des challenges énergétiques spécifiques. De nombreuses îles ne sont pas connectées aux réseaux électriques européens et sont dépendantes d'énergies fossiles importées, notamment de générateurs thermiques au fuel. Les systèmes énergétiques dont ils dépendent ont tendance à être moins fiables, plus chers et émettent plus de gaz à effet de serre que sur le réseau continental européen.

En réponse à ces problèmes, le projet ICE considère le cycle entier de l'énergie, 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 méthode générale reproductible pour d'autres systèmes énergétiques intelligents isolés ailleurs. Pour transférer cette méthodologie à d'autres territoires isolés, ICE proposera une offre commerciale globale de transition bas carbone. Cela comprendra une évaluation complète des ressources et des conditions énergétiques locales, une proposition de modèle sur mesure pour la transition énergétique et un ensemble de compétences et de technologies bas carbone disponibles dans un consortium d'entreprises sélectionnées. Ce consortium certifié ICE fera la promotion de cette offre auprès d'autres territoires isolés dans et hors de la zone Manche (5 territoires dans un premier temps). Le partenariat ICE réunit des chercheurs et des organismes de soutien aux PME et bénéficie d'une complémentarité France–RU en termes de connaissances et de développement technologique et commercial.

L'implication de PME locales et européennes contribuera à renforcer la compétitivité et la coopération transnationale.



Table des matières

Rapport ICE L3.1.1	3
Conception d'interventions et de solutions techniques pour des systèmes énergétiques isolés	3
1. Introduction.....	8
2. Eléments méthodologiques.....	8
2.1. Etablir un diagnostic	8
2.2. Définir des objectifs.....	9
2.2.1. Réduire les consommations	11
2.2.2. Augmenter les productions d'énergie renouvelable.....	11
2.2.3. Ajouter de l'intelligence	13
2.2.3.1. Adapter la production aux consommations.....	13
2.2.3.2. Adapter la consommation aux productions.....	14
2.3. Choisir des options	15
2.4. Sélectionner des briques technologiques.....	16
2.5. Mettre en œuvre	17
3. L'île d'Ouessant	18
3.1. Contexte de l'île.....	18
3.2. Les défis et contraintes de l'île	19
3.2.1. La consommation d'énergie	19
3.2.2. La production d'énergie	20
3.2.3. Les variabilités	21
3.3. Les solutions techniques possibles	23
3.3.1. Le stockage	23
3.3.2. Le pilotage	23
3.3.3. Les substitutions.....	24
3.4. Les solutions sélectionnées	25
3.4.1. L'Energy management system + Stockage	25
3.4.2. Le lissage de la production hydrolienne	26
3.4.3. Le pilotage en aval des compteurs intelligents	26
1°) Pilotage tarifaire	26
2°) Le pilotage direct	27
3.4.4. Le changement des comportements : le consom'acteur	28
4. Université d'East Anglia.....	30
4.1. Contexte	30
4.2 Les Enjeux et contraintes de l'UEA.....	31



4.2.1. Consommation énergétique.....	31
4.2.2 Approvisionnement en énergies	33
4.2.3 Variabilités.....	34
4.2.4. Autres défis et opportunités	37
4.3 Les solutions techniques possibles.....	38
4.3.1 Solutions énergétiques liées aux bâtiments.....	40
4.3.2 Solutions énergétiques liées aux déplacements	41
4.4 Solutions retenues.....	42
4.4.1 La raison d'être d'une rénovation de chauffage intelligente	42
4.4.2 Caractéristiques du système	43
4. Résumé.....	45



1. Introduction

Ce document a été rédigé dans le cadre du projet ICE. Il a vocation à fournir des éléments méthodologiques pour la mise en place d'un « smart grid » ou réseau intelligent dans le cadre d'un système énergétique isolé.

La première partie décrit une méthodologie de réflexion qui peut s'appliquer à tout système énergétique isolé, voire même pour des systèmes énergétiques qui souhaitent obtenir un équilibre interne même s'ils peuvent se raccorder au système énergétique continental ou à un système énergétique local de moindre importance.

Chaque système énergétique est unique et peut présenter des enjeux très différents selon son contexte propre. Néanmoins, les étapes décrites dans la première partie sont suffisamment génériques pour trouver des applications partout. Dans la deuxième partie du document, deux systèmes énergétiques spécifiques sont décrits, ce qui permet de mieux voir l'application de la méthode à chaque cas.

2. Éléments méthodologiques

2.1. Etablir un diagnostic

La première étape fondamentale avant de se lancer dans une démarche de « smart grid » est d'établir un diagnostic le plus complet possible de l'état actuel du territoire ciblé.

Le premier des critères est de déterminer le nombre d'habitants ainsi que son évolution dans le temps (identifier des variabilités saisonnières, une tendance globale à la hausse ou à la baisse). Il faut également caractériser les activités présentes ou à venir sur le territoire. Les moyens à consacrer à cette phase de diagnostic seront directement proportionnés à l'importance du territoire étudié.

Cette première étape doit permettre de caractériser **les besoins énergétiques du territoire**. Si le système énergétique est existant, il faut recenser les différents postes de consommation et obtenir les relevés de consommation. Ceux-ci se répartissent généralement en 3 catégories : les besoins de chaleur, les besoins de mobilité et les besoins électriques. Pour un système en création, il faut évaluer les besoins à satisfaire. Cette analyse doit permettre d'identifier également la répartition dans le temps de ces besoins et notamment vérifier les saisonnalités mais également les répartitions jour/nuit ou hebdomadaires. Il est important d'évaluer également le degré de criticité du besoin de consommation. Certaines consommations sont indispensables pour les habitants et leur non-satisfaction empêche le maintien des activités et des populations : besoins de chauffage ou de climatisation, alimentation en eau, besoins sanitaires ou sécuritaires, transports d'urgence... D'autres besoins sont de nature à favoriser l'organisation sociale mais ne sont pas indispensables, on peut parler de besoins énergétiques « de confort ». Enfin, certains besoins visent à garantir un mode de vie équivalent aux zones les plus développées de la planète et peuvent être considérées comme un luxe.

En fonction de la taille du territoire, le diagnostic pourra présenter différents degrés de précision. Dans le cas d'un périmètre très restreint, l'étude pourra aller jusqu'à la rencontre des consommateurs, et notamment les plus gros. Dans le cadre d'un territoire plus vaste, l'étude pourra se contenter de caractériser les courbes de charge des différentes énergies et reconstituer des profils-types.

En parallèle, il faut conduire une analyse détaillée des différents **moyens de production énergétique** locaux et des ressources importées. Pour tenir compte de la problématique des dérèglements climatiques, il est important de rechercher quels sont les potentiels de production d'énergie locaux, renouvelables et non émetteurs de gaz à effet de serre. Le document T1.1.1 Resource Assessment, également produit dans le cadre du projet ICE, fournit des éléments méthodologiques pour cette phase de diagnostic. La satisfaction



de besoins énergétiques peut néanmoins s'appuyer sur des moyens de production moins durables mais permettant de garantir la sécurité d'approvisionnement et le confort d'usage, compensant ainsi la fragilité liée à l'isolement.

Une attention particulière sera portée sur le contexte climatique et géographique du territoire considéré. En effet, l'ensoleillement, les températures journalières moyennes au cours d'une année, la pluviométrie, les vents dominants... sont autant de paramètres qui vont influencer la consommation énergétique et la production énergétique et donc impacter le système de production (typiquement le fort effet de saisonnalité hiver/été dans les pays tempérés).

Une autre étape du diagnostic vise à comprendre **le fonctionnement du système énergétique** existant ou à mettre en place. Quels sont les acteurs en présence ? Qui peut prendre les décisions et piloter le système énergétique ? Quelles sont les ressources possibles ? Quelle valeur peut-on donner à l'énergie qui est ou sera distribuée par rapport au contexte socio-économique ou par rapport aux politiques publiques ?

Cette phase du diagnostic tentera aussi de rapprocher consommation et production permettant ainsi d'identifier les points critiques du système énergétique à savoir : Les pertes énergétiques, les périodes de fortes et faibles demandes, la réactivité du système énergétique face aux variations de demandes.

Globalement, la gestion d'un système énergétique isolé risque d'être confrontée à une plus grande fragilité et à de potentiels surcoûts d'investissement et de production par rapport à un système de taille plus vaste qui permet de mutualiser les coûts et les moyens, en plus de pouvoir compter sur un effet d'interconnexion entre différentes zones du territoire, permettant de lisser consommation et production. C'est pourquoi il est indispensable de mener une réflexion particulière pour comprendre pourquoi le territoire est isolé actuellement (raison géographique, politique, économique). De cette base, différents scénarii peuvent être envisagés pour sortir de cet isolement avec les conséquences propres à chacun. Quel est le bénéfice d'un raccordement à un réseau existant par rapport aux coûts et au service rendu ?

Le diagnostic pourra se déployer en plusieurs étapes. Un premier diagnostic sommaire peut permettre de passer à l'étape suivante de définition des objectifs. Néanmoins, par la suite, des diagnostics beaucoup plus complets devront probablement être menés pour parvenir à une mise en œuvre opérationnelle du smart grid.

2.2. Définir des objectifs

Une fois l'état des lieux réalisé, il faut ensuite définir les objectifs du système énergétique à mettre en place. Pour cela, il est nécessaire de mener une concertation la plus large possible pour favoriser l'adoption des objectifs par la population et par les autorités locales. La question de l'ambition des objectifs est un point fondamental. Des objectifs irréalistes sont contre-productifs car les efforts demandés aux consommateurs, producteurs et au régulateur du système énergétique ne seront pas acceptés. Des objectifs trop restrictifs ne permettent pas de construire une stratégie dans le temps et une feuille de route claire.

Les objectifs peuvent porter sur plusieurs aspects, mais vont s'inscrire de façon générale dans le mouvement général de la réduction de l'impact sur l'environnement (climat, biodiversité) avec comme objectif final de tendre vers un système durable. Parmi les différents objectifs possibles, on peut noter les suivant :

- **Autonomie** : L'autonomie totale est un objectif admirable mais ne peut pas être posé d'emblée comme une évidence. Il faut ainsi se poser les questions suivantes : Dans quelle mesure l'autonomie du territoire considéré est matériellement possible et souhaitable ? Qu'impliquerait concrètement d'être autonome ? Comment atteindre cette autonomie ? De plus, la notion



d'autonomie peut être considérée selon les secteurs énergétiques (chaleur, mobilité, électricité) ou sur le système énergétique global. Quel est le « prix » de cette autonomie en termes financiers ou en termes d'adaptation des activités locales ? En particulier, si le territoire dispose d'un fort potentiel en énergies renouvelables et durables, n'est-il pas plus pertinent d'envisager son raccordement aux réseaux proches, que de viser l'autonomie.

- **Sécurité du système énergétique :** Selon le territoire, le degré d'exigence sur la sécurité peut être très variable. Le niveau auquel se situe le besoin de sécurité, impacte directement les infrastructures (redondance, stockage, pilotage), les coûts, la maintenance, l'espace. Par exemple : Est-il possible d'accepter des coupures électriques exceptionnelles annoncées (5-10 jours/ans) lors de périodes de fortes demandes ? Ou de mettre en place un « couvre-feu » énergétique permettant de réduire les consommations drastiquement en période creuse de production. Combien de coupures et de quelles durées sont acceptables ?
- **Résilience :** Sur un territoire isolé, la résilience du système est primordiale ne pouvant pas, par définition, être aidé ou appuyé par un réseau extérieur ou bénéficier de moyens de secours rapides. Quels sont alors les choix voulus pour atteindre une résilience importante ? L'utilisation de technologie de pointe, demandant des pièces particulières et du personnel très qualifié est-elle à favoriser par rapport à une technologie plus robuste, peut-être avec un rendement plus faible, mais qui en cas de faille sera facilement remise en service ? De plus le caractère isolé du territoire considéré complique encore plus les démarches de maintenance et de réparation, ce qui tend à exclure les solutions trop « high-tech » au profit de solutions « low-tech ».
- **Pollutions/Nuisance :** Produire¹ de l'énergie conduit à procéder à un changement entre un état initial et un état final, d'un point de vue thermodynamique. Par conséquent, il est impossible de produire de l'énergie sans modifier son environnement (puisque cette énergie provient de l'environnement). Cela signifie que pour produire de l'énergie utilisable par l'homme, il faut déjà en disposer sous une forme ou une autre (vent, bois, marées, soleil...) sur le territoire. De ce fait, il y aura toujours de la pollution et des nuisances résultant du système énergétique. Il faut regarder le ratio « gain » / « contraintes » et comparer à la situation actuelle. Aussi, il est important d'avoir une prise en compte globale des impacts, et pas seulement sur le territoire d'études : notamment avec la prise en compte de l'impact des ressources importées/exportées. En effet, un nouveau système permettant de limiter l'importation de ressources permet alors de réduire les besoins énergétiques dans l'ensemble (réduction du transport) mais cela va conduire à puiser plus d'énergie dans le périmètre du territoire, induisant donc plus d'impacts sur l'environnement proche, dont la nocivité est à quantifier. Au-delà des pollutions immédiates et locales et leurs conséquences sur l'environnement et la santé, la crise climatique oblige à se poser la question des émissions de gaz à effet de serre, plutôt invisibles et indolores localement mais ayant un effet global.

Fondamentalement, dans le cadre d'un système énergétique isolé, la définition des objectifs ne peut que reposer sur leur **acceptabilité par la communauté**. C'est sur ce point que beaucoup de travail est à faire, car si de nombreuses solutions techniques existent, c'est souvent l'acceptation de la population du territoire qui représente le point décisif. Par manque de communication, des solutions qui pourraient s'avérer efficaces peuvent ne pas être acceptées. De plus, le critère temporel est à prendre en compte (autant que possible), ainsi une technique aujourd'hui acceptée ne le sera peut-être plus dans 5-10-20... années (exemple réacteurs nucléaire, incinérateurs), et inversement des technologies non acceptées

¹ On ne peut produire de l'énergie, selon le 1^{er} principe de la thermodynamique, mais seulement la convertir. Par abus de langage, nous utilisons dans ce document l'expression « produire de l'énergie », mais son sens est bien « convertir de l'énergie ».



aujourd'hui peuvent être adoptées par la population locale (ex. éolienne). L'implication de la population dans les démarches de transition peut permettre d'accélérer l'acceptation, notamment en favorisant les initiatives citoyennes (ex projet européen Interreg North West ECCO²).

Ces différents points sont autant de critères à définir en tant qu'objectifs dans la mise en place d'un nouveau système énergétique sur un territoire isolé, mais à de plus fortes raisons sur tout type de territoire. Sur un territoire isolé, c'est surtout le point de résilience du système qui est primordial avec l'acceptabilité.

2.2.1. Réduire les consommations

Selon le principe que le kilowattheure (kWh) le moins cher et le moins polluant est celui que l'on ne produit pas, toute démarche doit débiter par la recherche de la réduction des consommations.

Sur la base du diagnostic, il faut chercher les réductions possibles dans chacun des secteurs de consommation (chaleur, mobilité et électricité), voire chercher les substitutions entre type d'énergies adaptées aux objectifs définis.

Il faut répertorier les besoins en fonction du secteur de consommation : résidentiel, bâtiments publics, activités tertiaires, industries.... La deuxième étape consiste à identifier les gisements d'économies en volume puis à les caractériser en termes de facilité de mise en œuvre et de coût. Un indicateur permet de hiérarchiser les différentes interventions à mener : **le coût du kWh économisé**. Ce coût est calculé sur la base des investissements nécessaires mais aussi sur la base des moyens nécessaires à la mise en œuvre. Par exemple, en ce qui concerne le chauffage résidentiel, l'isolation représente un gisement d'économie très important mais la mise en œuvre nécessite des travaux d'isolation et des moyens d'animation pour convaincre des particuliers d'agir.

Une hiérarchisation des actions est alors planifiable par ordre décroissant de quantités totales d'énergies économisées, et/ou par ordre croissant de coûts énergétiques. Le ou les critères de sélection seront aussi fonction du délai de mise en œuvre de l'action.

Ce plan d'action doit permettre de définir, à chaque échéance, les besoins de consommation actualisés et ainsi établir les courbes de charge des différents besoins en énergie. Sur ces nouvelles données, un nouveau plan d'action de réduction des consommations énergétiques peut être définis.

2.2.2. Augmenter les productions d'énergie renouvelable

Dans les mix énergétiques des territoires isolés, on retrouve en général une faible part d'énergie renouvelable provenant du territoire, et une part très importante de combustibles fossiles importés³ en raison de leur grande densité énergétique (ou à partir d'un gisement fossile sur le territoire, bien que cela entrainerait probablement son exploitation et donc un probable « raccordement » du territoire isolé). Compte tenu des considérations mondiales actuelles sur le changement climatique et ses causes et

² Source : <http://www.nweurope.eu/projects/project-search/ecco-creating-new-local-energy-community-co-operatives/>

³ IRENA (2018), *Transforming small-island power systems: Technical planning studies for the integration of variable renewables*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi



conséquences⁴, l'utilisation de combustibles fossiles est à réduire pour tendre vers une production d'énergies uniquement renouvelables. Les énergies renouvelables sont, par définition, des énergies de « flux », qui ont un fort besoin en espace (utilisation d'une énergie diffuse, contrairement aux énergies fossiles qui sont des énergies de « stocks », concentrées en un point).

L'avantage du développement des énergies renouvelables permet d'utiliser les ressources produites dans le périmètre du territoire considéré, et ainsi de réduire les dépendances envers l'« extérieur ». Ce qui, pour les territoires isolés, représente dépenses importantes et une source de tension due à la variabilité sur l'approvisionnement (En période de crise la zone exportatrice peut garder son énergie et réduire ses exportations).

Tout d'abord, il faut réaliser un bilan des ressources actuellement disponibles sur le territoire isolé. Les énergies renouvelables provenant principalement de la biomasse (arbres, cultures), du soleil, du vent, des marées/rivières (si accès à la mer), et de la géothermie. Il faut aussi regarder sur du moyen à long terme, en réalisant une étude prospective avec des scénarii comprenant l'implémentation de filières nouvelles sur le territoire permettant d'augmenter le potentiel de production d'énergie renouvelable. Typiquement, la mise en place de cultures et de rotation de champs permettant de produire de la biomasse, mobilisable pour l'énergie, retombant alors dans l'ancienne vision de l'agriculture et de la planification des cultures avec : 1/3 pour la nourriture, 1/3 pour l'énergie (bois ou nourriture animale) et 1/3 en jachère (retour à un état initial, i.e. bouclage du cycle, et donc énergie renouvelable).

L'évaluation des quantités mobilisables pour la production d'énergie doit se faire en prenant en compte les technologies existantes et surtout leur maturité technologique. Ce point est particulièrement important en territoire isolé. Des technologies robustes et fiables sont à préférer afin de tendre vers une résilience maximale.

Les technologies susceptibles d'être mise en place sur les territoires doivent cependant satisfaire aux contraintes réglementaires du territoire, dans le but de limiter les impacts environnementaux et sanitaires. Il faut aussi que les autorités soient aptes et ouvertes au changement. En effet, le changement radical qui doit être mis en œuvre pour tendre vers une société renouvelable implique de changer complètement les habitudes prises depuis les décennies passées d'abondance d'énergie fossiles. Il convient donc de bien identifier les acteurs potentiels de cette nouvelle production mais aussi les décideurs. Le cadre légal, hérité des périodes passées, peut avoir besoin d'être modifié ou adapté. Les décideurs publics devront donc être impliqués dans le projet de transition énergétique du territoire isolé. La recherche de solutions peut et doit dépasser les seules contraintes légales actuelles.

De plus, ces changements d'habitudes d'un point de vue encadrement légal sont d'autant plus importants que l'implantation d'unité de production renouvelable sur le territoire va de fait impacter l'environnement direct et aura des conséquences. Au lieu de produire de façon centralisée à très grande échelle, concentrant alors très localement une quantité importante de nuisances et de pollution, la production d'énergie délocalisée, à petite échelle va rendre les nuisances et pollution plus diffuses sur le territoire mais aussi plus proche de chacun. Typiquement, au lieu d'une centrale fioul en un point, on se retrouve avec 10, 100, ou 1000 éoliennes/panneaux solaires dispersés sur le territoire. Un des avantages est que cela responsabilise la population en étant au contact des nuisances et de la pollution qu'elle-même crée par son activité. De là, il devient alors d'autant plus utile et efficace de se concentrer sur la réduction de consommation énergétique, réduisant de fait les nuisances et pollution.

⁴ IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp



Pour finir, il reste à coordonner et accorder les trois aspects que sont le coût de production énergétique, la sécurité de l’approvisionnement, et les pollutions engendrées. La sécurité d’approvisionnement passe par des infrastructures supplémentaires, augmentant le coût de production. La pollution, et plus exactement la limitation de la pollution, impose d’ajouter des infrastructures, augmentant le coût. Concernant le coût suite à l’implantation de nouvelles solutions sur le territoire, il faut pouvoir comparer son évolution par rapport à la situation antérieure. De plus avec les ambitions mondiales de tendre vers le 100% renouvelable, il semble acceptable (voire même inévitable d’un point de vue physique) de devoir payer plus cher de l’énergie renouvelable que des énergies fossiles. D’un point de vue technique, on peut s’intéresser à l’indicateur EROEI (pour *Energy Returned On Energy Invested*) qui caractérise la quantité d’énergie utilisable sur la quantité d’énergie utilisée pour un type d’énergie donné. Plus la valeur du EROI est importante, plus le gisement d’énergie est rentable. De plus, quand EROI est inférieur à 1, cela signifie qu’il faut dépenser plus d’énergie que ce qu’on récupère, on ne peut alors plus considérer le gisement comme une source d’énergie. Les combustibles fossiles, montraient des EROEI très importants au début du XIX^{ème} siècle (pétrole >100, charbon > 80) mais qui sont aujourd’hui réduits (pétrole ≈ 8, charbon ≈ 2-17)⁵. Cette baisse de EROEI s’explique parce que l’énergie fossile est sous forme de stocks finis, et que les stocks les plus accessibles ont d’abord été extraits, puis une fois vides, il a fallu aller sur les stocks un peu plus difficiles d’accès (donc demandant plus d’énergie), puis de plus en plus difficiles d’accès, etc... A contrario, les énergies renouvelables (si gérées de façon durable) sont des énergies de flux qui se renouvellent. Leurs caractères diffus font qu’elles montrent de faibles EROEI par rapport aux énergies fossiles du début du XIX^{ème} siècle (biomasse ≈ 3-5, éolienne ≈ 5-20, géothermie ≈ 2-13, Solaire thermique ≈ 4-9, PV ≈ 1,7-10)⁶. Par contre, si utilisées durablement, leurs EROEI vont rester stables dans le temps.

L’idée globale de cette étape est de définir, aux différents horizons de temps, les sources de production d’énergie, renouvelable ou non. Il faut également qualifier le degré d’intermittence des productions. Idéalement, il faut pouvoir constituer la courbe de production à différents pas de temps (heure, journée, saison...) en intégrant les caractères intermittents de certaines énergies, ainsi que le caractère prévisible ou non. La comparaison avec la courbe des besoins en consommation permet d’identifier les points critiques du système énergétique qui vont devoir être étudiés dans la suite de la démarche pour apporter les éléments d’intelligence du réseau nécessaires pour réduire les coûts totaux du système.

2.2.3. Ajouter de l’intelligence

2.2.3.1. Adapter la production aux consommations

Actuellement dans beaucoup de territoires, c’est au système de production d’énergie de s’adapter à la demande, mais jusqu’à un certain point : quand la demande est vraiment trop importante, des mesures comme l’abaissement de tension ou la coupure d’électricité peuvent être prises, ce qui impose au consommateur de s’adapter. La production centralisée a donc été le modèle dominant associé aux choix énergétiques d’une période d’abondance d’énergies de « stock ».

Les consommations d’énergie fluctuent au cours d’une journée, et montrent des pics d’intensité associés aux modes de vie comme par exemple, le matin (7h-9h), le midi (12h-14h) et le soir (18h-23h) dans un territoire où les habitants travaillent mais que l’intensité énergétique des activités industrielles est faible (ou constante). Les fluctuations sont aussi importantes à l’échelle d’une année, notamment avec le cycle été/hiver où la demande en hiver est particulièrement haute à cause du chauffage ou en été pour cause de

⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Taux_de_retour_%C3%A9nerg%C3%A9tique

⁶ IRENA (2018), *Transforming small-island power systems: Technical planning studies for the integration of variable renewables*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi



climatisation. Dans les sites touristiques, les fluctuations sont liées à l'affluence de personnes. Les territoires isolés sont souvent de façon contradictoire très attractifs d'un point de vue touristique.

Les énergies renouvelables sont diffuses et, pour la plupart, sont intermittentes (éolien, hydrolien, solaire). Pour que la production d'énergie suive la consommation, il faut disposer de moyens de pilotage or il n'est pas possible de contrôler le vent, le soleil ou les rivières. Par contre, la biomasse est stockable, on peut planifier sa production pour les années à venir, et son utilisation permet de produire de l'énergie à la demande (combustion, gazéification, méthanisation). En plus des installations éoliennes, photovoltaïque ou hydraulique, un mix énergétique renouvelable qui ambitionne une stabilité de production doit alors contenir des moyens de production pilotable.

On peut aussi utiliser des moyens de stockage d'énergie, mais le stockage se fait toujours avec des pertes, et les densités énergétiques assez faibles (0,2-4 MJ-e/L pour les solutions actuelles contre 36 MJ-th/L pour le diesel⁷, soit environ 10 MJ-e/L avec 30% de rendement de conversion) impliquent de devoir disposer d'espace pour stocker l'énergie (vallée pour barrage STEP, volume + quantité de métaux pour les batteries, grand réservoir pour l'air comprimé...). Une capacité de stockage sera envisageable sur un territoire isolé, mais son champ d'action sera plutôt limité, et ne permettra de stocker qu'une très faible partie de l'énergie totale produite sur l'année. Il faudra plutôt investir dans des moyens de productions pilotables (la biomasse jouant le rôle de stockage pour rappel).

De plus, le vent ne soufflant pas à vitesse et direction constantes, la présence de nuages occultant le soleil, il faut pouvoir faire face aux rapides variations subies sur la production d'énergie renouvelable. Il s'agit plutôt de ce qu'on appelle le « lissage ». Les moyens techniques de stockages d'énergie jouent en premier lieu le rôle de lissage que de stockage à proprement parler, compte tenu des faible quantité stockables.

Les systèmes de production d'énergie nationaux et internationaux, reliés entre eux, arrivent à adapter la production pour suivre les variations de demandes. Notamment en exportant des zones de forte production vers les zones de faible production. Cependant, sur un territoire isolé, par définition de taille relativement faible, il n'existe pas de zone de forte production et de basse production, mais plutôt une seule configuration. L'homogénéisation du flux de vent, de soleil, de marées contraint de ne pas pouvoir équilibrer les variations de productions d'énergie renouvelables intermittentes. C'est pourquoi un autre schéma est en train de se dessiner pour les territoires isolés.

A ce stade, le principal levier sont les installations de stockage (courte et longue durée) et de lissage. Selon les technologies, le coût peut être très variable mais entraîne généralement une augmentation non négligeable pour le système énergétique. L'étape suivante visera à diminuer ces coûts grâce aux technologies innovantes disponibles dans le cas d'un smartgrid.

2.2.3.2. Adapter la consommation aux productions

Avec le déploiement des énergies renouvelables intermittentes et de l'intelligence des réseaux, un renversement du schéma est proposé en adaptant la consommation à la production d'énergie. On peut par exemple essayer de déplacer dans le temps les périodes de consommations, vers un moment où la production d'énergie est importante. Par exemple, les équipements de production d'eau chaude sanitaire (ECS) sont aujourd'hui asservis pour fonctionner la nuit (période d'heure creuse à tarif plus faible). On pourrait les faire fonctionner lorsque la demande est faible et la production renouvelable importante, quitte à découper le cycle de chauffage de l'eau sur 2 ou 3 périodes discontinues sur une journée.

⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density



Une autre possibilité est de substituer les façons d'utiliser l'énergie. Ainsi, au lieu d'utiliser de l'électricité pour chauffer de l'eau, on peut utiliser des panneaux solaires pour la production d'eau chaude dans la journée. Ce qui permet d'obtenir le même service (de l'eau à 65°C) mais avec un impact quasi nul sur le réseau électrique. La substitution d'une énergie par une autre peut permettre de déplacer une demande de consommation vers l'énergie la plus disponible à un moment donné. Cependant, cela ne représente que très peu d'applications, et son potentiel reste limité.

Enfin un potentiel réside dans le changement de comportement des habitants et des activités du territoire. Cela peut passer par de la pédagogie, pour permettre de redonner à chacun la signification et les implications lors de l'utilisation d'énergie. Mais il peut également être mobilisé par des technologies de pilotage, relativement transparentes pour l'utilisateur ou par des incitations tarifaires.

Par exemple, pour l'électricité, plutôt que d'avoir un tarif unique, on peut aussi « encourager » et orienter la consommation énergétique sur certaines périodes avec des offres tarifaires proposant une gamme de tarifs allant de très incitatifs à très dissuasifs. Par contre, il faut pouvoir informer les usagers des changements de plages tarifaires, et aussi pouvoir les prévenir à l'avance (comment ?) afin de pouvoir s'adapter et planifier les consommations à court terme.

Une vision globale du système énergétique est nécessaire pour orienter au mieux ces modulations, dans le cadre de la communauté du territoire, en fonction de ses valeurs et de l'acceptabilité des formules retenues. La technologie rejoint ici les questions d'organisation sociale, de priorités de l'intérêt général sur l'intérêt individuel et donc de l'acceptabilité des choix.

Cette étape aura permis de définir les potentiels de déplacements de consommations ou substitutions mais aussi les conditions selon lesquelles ces potentiels peuvent se concrétiser. Les premières expérimentations de smart grids permettent d'estimer un potentiel de 5 à 15% de consommations déplaçables. En comparaison des potentiels liés aux économies d'énergies, on voit bien que l'intelligence est un complément, non négligeable mais ne peut être la solution unique de durabilité d'un système énergétique isolé.

2.3. Choisir des options

Selon la situation particulière de chaque territoire isolé, certaines solutions ne seront pas envisageables. Premièrement il faut pouvoir disposer des moyens techniques pour mettre en place une solution. Mais l'acceptabilité sera le critère a priori le plus important. Les acteurs locaux devront s'impliquer de façon coordonnée pour proposer une solution et l'expliquer. Encore une fois, en territoire isolé, la durabilité de la solution devra être très importante, sur les aspects environnementaux, économiques et sociétaux.

Le choix d'une option devra être fait en toute connaissance de cause, et une fois définitif, sa mise en place devra aller jusqu'au bout. D'où l'importance de bien développer le projet et de mobiliser tous les partenaires.

Il semble donc que les options doivent avoir une fiabilité relativement haute. Toutefois, il faut pouvoir proposer des choix avec une part de nouveauté, dans le but de développer et découvrir de nouvelles applications dans le cas de territoires isolés. Cela dépendra surtout des capacités du territoire (ou de la structure encadrant ce territoire) à absorber les conséquences d'un échec partiel ou complet provenant d'un choix nouveau. De plus, l'urgence liée au changement climatique implique de trouver des solutions efficaces rapidement, ce qui favorise d'essayer une multitude de solutions, pour pouvoir éliminer les moins bonnes rapidement et améliorer celles qui semblent prometteuses.



Face aux incertitudes sur les évolutions du système énergétique, il peut être utile de privilégier les options sans regrets, c'est-à-dire celles qui apportent un plus pour le système énergétique à moindre coût quelles que soient les variations futures de celui-ci. Par exemple, se doter de la capacité de piloter des ballons d'eau chaude sanitaire est utile aujourd'hui sur un système énergétique alimenté au fuel mais le sera aussi demain en présence d'énergies renouvelables intermittents, prévisibles ou non.

Les options permettant de réduire la facture énergétique du territoire sont également à privilégier : réduction des importations extérieures (énergies fossiles ou biomasse), développement des activités sur le territoire, réduction des consommations et donc du coût de l'énergie pour les habitants et activités du territoire...

D'importants compléments sur les moyens de choisir les options sont détaillés dans le document 2.1.2 Méthodologie générale de ICE (partie 6). L'adhésion des populations est un facteur prédominant de réussite du smart grid.

Enfin, la disponibilité des ressources financières reste le nerf de la guerre pour déterminer les options. Quel prix est-on prêt à mettre pour un système énergétique performant et durable ? Quels sont les acteurs qui peuvent y être intéressés. Pour un territoire isolé ayant développé une forte conscience environnementale, il est possible d'imaginer que des populations soient prêtes à contribuer au regard des avantages attendus. La piste d'une structure faisant participer les acteurs locaux doit être envisagée en complément des ressources pouvant provenir des opérateurs énergétiques ou des pouvoirs publics.

2.4. Sélectionner des briques technologiques

Le choix des briques technologiques doit se faire en fonction de la maturité technologiques de ces briques et du rapport coûts / bénéfices (basé sur l'indicateur €/MWh_{économie} ou €/CO₂_{fossile-évité}). Toute brique technologique mise en place à un coût qu'il convient de comparer aux bénéfices attendus. De même, elle est susceptible d'avoir des effets sur le système énergétique et pourrait risquer, par exemple, d'accroître la consommation énergétique, globalement ou sur des périodes de forte demande. Par exemple, des pompes à chaleur air-air peuvent fortement augmenter la consommation lors des pics hivernaux même si elles réduisent la consommation globale ou encore, la gestion de données numériques volumineuses peut accroître la consommation d'électricité et le besoin en climatisation.

Il est donc très important de faire un benchmarking des smart grids existants afin de vérifier les résultats obtenus sur d'autres territoires mais aussi s'assurer de leur adéquation avec les problématiques locales identifiées. Une solution adaptée sur un système isolé n'est pas forcément transposable sur un autre ou peut nécessiter des ajustements.

Les options retenues peuvent ne pas avoir encore été développées. Il convient alors de vérifier si c'est parce que la situation du système isolé est unique ou rare ou s'il s'agit d'un besoin n'ayant pas encore été identifié mais susceptible d'être reproduit ailleurs.

Un élément important du choix est la capacité du territoire isolé à gérer la technologie identifiée. Cette capacité de gestion s'évalue sur le degré de technicité que doivent maîtriser les usagers et leur motivation à utiliser des équipements technologiques mais aussi sur la capacité de professionnels du territoire à intervenir sur les équipements ou encore des difficultés potentielles d'implanter une technologie sur un territoire isolé géographiquement. Il faut également regarder l'intérêt économique du territoire : celui-ci bénéficiera-t-il de retombées en termes d'activité économique ou se créera-t-il une nouvelle dépendance extérieure ?



Les financements mobilisables ont également un poids important dans les décisions de choix. Entre deux briques équivalentes en termes de potentiel d'économie de consommation ou réduction du prix de la production, la solution qui peut bénéficier d'une subvention consommera moins les ressources financières disponibles.

L'existence d'acteurs pouvant proposer des solutions de briques technologiques va aussi influencer le choix de ces briques. C'est un des objectifs du projet ICE de répertorier les acteurs potentiels et de les amener à travailler pour les systèmes énergétiques isolés en adaptant leurs technologies aux spécificités de l'isolement.

2.5. Mettre en œuvre

Une fois que la stratégie a été bien définie, avec chaque action contenant ses briques technologiques et la méthode de déploiement, il faut mettre en œuvre le programme d'actions.

Cette étape vient concrétiser tout le travail préliminaire réalisé. Les différents acteurs du territoire qui participent à la mise en place du plan d'action doivent s'investir et se concerter régulièrement. La quantification des investissements pour chaque action doit être bien défini (financier, humain, temporel). En parallèle, la recherche des financements doit permettre de couvrir les dépenses à engager. Les acteurs locaux ayant des intérêts pour réduire les consommations, une partie des financements pourra provenir d'un investissement de leur part, leur assurant des économies sur le coût de l'énergie avec le nouveau système énergétique.

Un financement citoyen pourra être proposé pour impliquer les habitants dans la transition de leur territoire, travaillant eux-mêmes pour certains pour les acteurs locaux.

Enfin, des subventions auprès de l'Etat ou de la Région auxquels appartient le territoire isolé pourront être sollicitées. Cependant, le nouveau système énergétique proposé doit pouvoir fonctionner sans l'apport continu d'aides extérieures, sinon sa définition même est à revoir.

Une fois le projet en cours de déploiement, des opérations de sensibilisation et de communication sont à réaliser, tout au long du projet, et même après une fois le système ayant atteint un rythme de croisière.

Une partie de la population n'aura pas forcément suivi de près le projet, et il faut aussi s'attendre à avoir une partie de la population avec des réticences voire des oppositions nettes sur la mise en place de ce nouveau système. Des ateliers explicatifs, des séances de débat avec différents membres de la société peuvent aider à éclaircir les différents points de doutes.

La mise en place d'un nouveau système fera face à des problèmes, qui sont bien-sûr attendus et à attendre. Une méthode d'amélioration continue est à bien définir en amont afin de tester les différentes actions, et d'évaluer leurs forces et faiblesses. Le lien avec les usagers est à maintenir, permettant de créer une confiance et de montrer de l'intérêt envers l'avis des utilisateurs. Leurs retours pourront permettre d'améliorer les protocoles premièrement définis.



3. L'île d'Ouessant

3.1. Contexte de l'île

L'île d'Ouessant est située à vingt-cinq kilomètres de la côte ouest du Finistère en France. Longue de huit kilomètres et large de quatre, sa superficie est de 15,58 km² (Figure 1). Lors du dernier recensement de 2015, l'île comptait 846 habitants, soit 54 habitants au km². En période estivale (Juillet-Août), la population de l'île peut monter jusqu'à 3 000 personnes/jour.

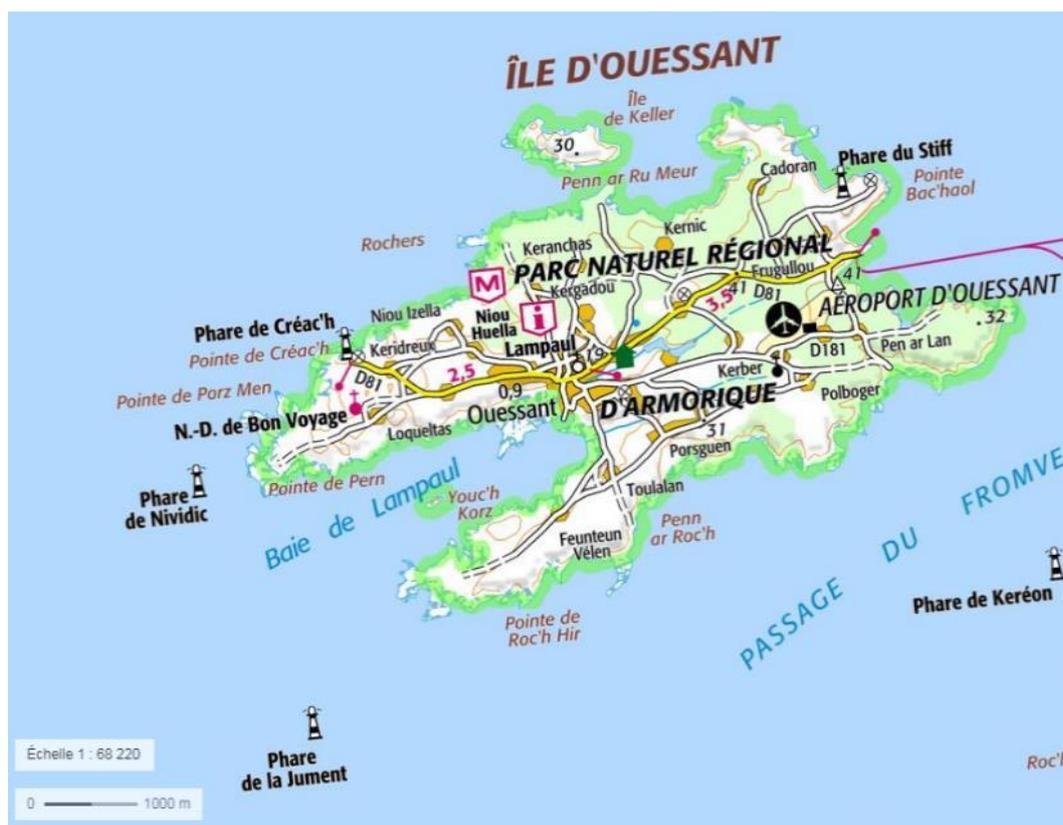


Figure 1 : Carte d'Ouessant (source : IGN Geoportail)

L'île d'Ouessant a un climat de type océanique. La température moyenne annuelle est d'environ 12 °C avec des variations de températures relativement faibles au cours de l'année, en moyenne entre 6 et 19°C. Les records absolus 29,4°C le 2 août 1990 et un record de froid à -7,7°C le 13 janvier 1987. Les précipitations moyennes sont de 750mm par an, variant d'environ 80mm l'hiver et 50 mm l'été. Les vents à Ouessant sont plutôt réguliers d'année en année avec des moyennes mensuelles de 10-12 m/s l'hiver et 6-8 m/s l'été. L'île bénéficie d'un ensoleillement modéré bien que nettement supérieur par rapport aux zones proches du continent avec une irradiance de 50 à 300W/m² en moyenne. Le Passage du Fromveur présente un courant de marée très important (8 à 10 nœuds) résultant d'une faille locale de 60 m de profondeur favorable à une exploitation hydrolienne.



3.2. Les défis et contraintes de l'île

L'île d'Ouessant est, comme Molène et Sein, une des rares îles du Ponant ne bénéficiant d'aucune connexion avec le réseau continental. On parle d'une ZNI, zone non interconnectée. Sa production d'électricité est réalisée à partir de générateurs fuel, ses carburants et autres ressources proviennent du continent (diesel, essence, gaz, bois) à l'exclusion d'une faible ressource en bois utilisée localement. Récemment ont été implantées les premières installations photovoltaïques et un prototype d'hydrolienne dans le Fromveur. Les objectifs de transition énergétique ont été fixés dans la « Programmation pluriannuelle de l'énergie » (PPE) française dans un volet spécifique dédiées aux ZNI de 70% d'énergies renouvelables en 2020 et 100% en 2030. Pour y parvenir, un smart grid sera nécessaire en complément du développement des énergies renouvelables et de la réduction des consommations d'énergie.

3.2.1. La consommation d'énergie

En France, il existe une péréquation tarifaire de l'électricité pour les citoyens sur tout le territoire. En conséquence, et bien que le coût de production d'électricité soit plus élevé à Ouessant qu'en France métropolitaine, les habitants d'Ouessant, paient l'électricité au même tarif que ceux de la métropole. Les autres sources d'énergie comme le bois, le gaz ou le fioul contiennent un surcoût due à l'importation.

En conséquence, les radiateurs électriques sont les principaux appareils de chauffage d'Ouessant. De plus, il n'y a aucun de réseau de gaz ou de chaleur sur l'île d'Ouessant, ce qui fait de l'électricité le principal vecteur énergétique utilisé sur l'île. C'est pourquoi la transition énergétique d'Ouessant est pour l'instant principalement focalisée sur l'électricité.

L'île doit importer un total annuel de 1 900 tonnes de produits pétroliers dont 1 600 tonnes pour la production électrique et 300 tonnes pour le chauffage et la mobilité.

Les données clefs sur l'utilisation d'électricité sur Ouessant sont :

- La consommation électrique totale est de l'ordre de 6 GWh/an.
- Le secteur résidentiel (BT≤36 kVA) compte pour près de 70 % de la consommation totale, le tertiaire et l'industrie (BT>36 kVA et HTA) pour 10 %, le secteur professionnel pour 20 % (BT≤36kVA).
- L'île compte environ 900 compteurs résidentiels dont une moitié correspond à des résidences secondaires, une centaine de compteurs professionnels, deux compteurs industriels (un seul avant 2015) et moins de dix compteurs tertiaires.
- 40% de l'énergie électrique est utilisée pour le chauffage.

Les habitations sont pour le plupart équipées de radiateurs électriques (75% pour les résidences principales, 85% pour les résidences secondaires). Les résidences peuvent avoir une chaudière bois ou fioul mais elles possèdent surtout un chauffage d'appoint avec du bois de récupération. Cela s'explique par le fait que le prix de l'électricité est subventionné de telle sorte qu'il est le même que sur le continent pour le consommateur (péréquation tarifaire de l'électricité). Par contre les autres énergies (fioul, bois ou gaz) doivent être importées sur l'île, impliquant un coût plus important, non subventionné.

Pour l'essentiel, il s'agit d'un habitat ancien et traditionnel subissant une thermosensibilité⁸ 75% plus importante que sur le continent malgré un climat plutôt favorable. En pratique, cela signifie que pour chaque baisse de 1°C de la température extérieure (en dessous de 12°C), l'augmentation de consommation

⁸ La thermosensibilité représente la sensibilité de la consommation énergétique pour le chauffage, en fonction de la température extérieure.



énergétique liée au chauffage est plus importante de 75% sur Ouessant par rapport à l'augmentation de consommation énergétique liée au chauffage sur le continent.

En normalisant la consommation électrique à climat constant (calcul du nombre de jours DJU, pour Degré Jour Unifié), on constate que la consommation entre 2011 et 2015 est relativement stable.

Tableau 1 : Consommations électriques réelles et à climat constant à Ouessant

Année	2011	2012	2013	2014	2015
Consommation réelle (MWh)	5 924	6 201	6 691	5 914	6 135
DJU18	1 975	2 202	2 259	1 932	2 037
Consommation à climat constant (MWh)	6 242	5 860	6 164	6 370	6 268

- Puissance moyenne consommée : 670 kW
- Puissance minimale consommée : 300 kW
- Puissance maximale consommée : 2 000 kW

L'analyse croisée entre la demande en électricité l'hiver et la modélisation du parc de logement (Figure 2 selon données INSEE) montre que la part de chauffage est estimée à 40% de la consommation totale annuelle de l'île, soit 2700 MWh/an.

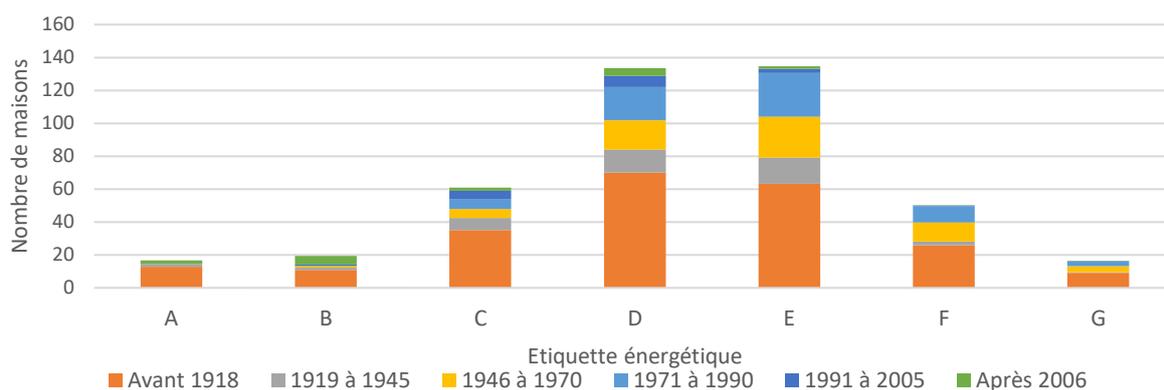


Figure 2 : Distribution des maisons en fonction de leur étiquette énergétique et de leur année de construction

3.2.2. La production d'énergie

L'énergie produite sur l'île est exclusivement sous forme d'électricité. Le carburant pour les véhicules est entièrement importé. Une part de bois très minoritaire est utilisée pour le chauffage soit en provenance de l'île soit en importation de bûches ou granulés.

Le parc de production d'électricité sur l'île, avant le projet ICE, était composé de :

- 4 groupes thermiques fonctionnant au fioul – 4 350 kW de puissance totale installée
- 1 centrale PV sur le Gymnase – 50 kW de puissance installée

La consommation en fioul pour la production d'électricité est de l'ordre de 1600 t/an. La production annuelle d'électricité représente en moyenne 6 570 MWh entre 2011 et 2016, pour une consommation finale annuelle d'électricité s'élevant à une moyenne de 6 173 MWh.



Tableau 2 : Production, consommation et estimation des pertes électriques à Ouessant

Année	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Production (MWh) [source : courbe de charge EDF SEI]	6 146	6 614	7 011	6 370	6 468	6 808
Consommation des clients (MWh) [source Enedis]	5 924	6 201	6 691	5 914	6 135	
Estimation des pertes (MWh)	222	413	320	456	333	

Les pertes d'électricité sont de l'ordre de 200 à 450 MWh/an soit entre 3 et 7% de la production.

Les émissions spécifiques de CO₂ par rapport à la consommation électrique sur l'île atteignent 777 gCO₂/kWh.

Le déploiement de centrales photovoltaïques sur les toitures des bâtiments publics s'est prolongé en parallèle du projet ICE. Un total de trois centrales sont en fonctionnement à fin 2020, pour une puissance totale installée de 94 kWc. D'autres projets sont à l'étude notamment sur la toiture de la Mairie, de l'Aérodrome, sur un nouveau hangar agricole...

En plus de ces centrales photovoltaïques sur toitures de bâtiments publics, un projet combinant 3 types d'énergie renouvelable est porté par l'entreprise Akuo Energy, et porte le nom de projet « PHARES ». Il a pour but de déployer d'ici le deuxième semestre 2023 :

- 1 éolienne de 900kW
- 500 kW de panneaux photovoltaïques
- 2 hydroliennes de 500kW chacune, soit 1MW au total
- Un stockage d'énergie sous forme de batterie, de 1 MW.

Ces capacités supplémentaires de production d'énergie renouvelable et locale, devrait permettre d'atteindre un taux d'électricité renouvelable de 65% en 2023.

3.2.3. Les variabilités

Les variabilités de consommation électrique sur l'île d'Ouessant sont très fortes sur une année, avec une période de forte consommation l'hiver (chauffage électrique), et une période de faible consommation l'été. Les mois de juillet et août montrent des consommations plus importantes qu'en juin et septembre, en raison d'une forte affluence touristique (vacances scolaires d'été).



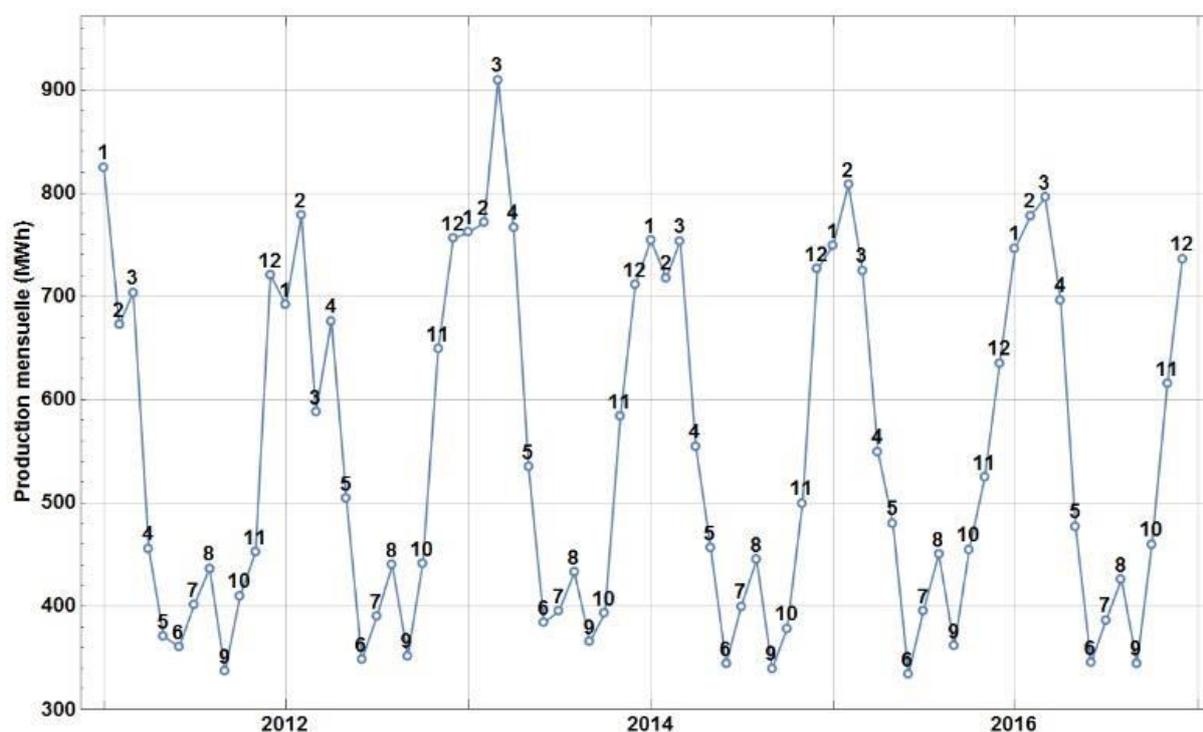


Figure 3 : Evolution de la production électrique (en MWh) - pas mensuel à Ouessant de 2011 à 2016

La consommation varie aussi à l'échelle d'une journée et montre des périodes de fortes consommations électriques le matin et le soir. On remarque notamment une rapide augmentation de la consommation le soir à 23h, qui correspond au passage à l'heure creuse, et qui se traduit par la mise en route des équipements de production d'eau chaude sanitaire.

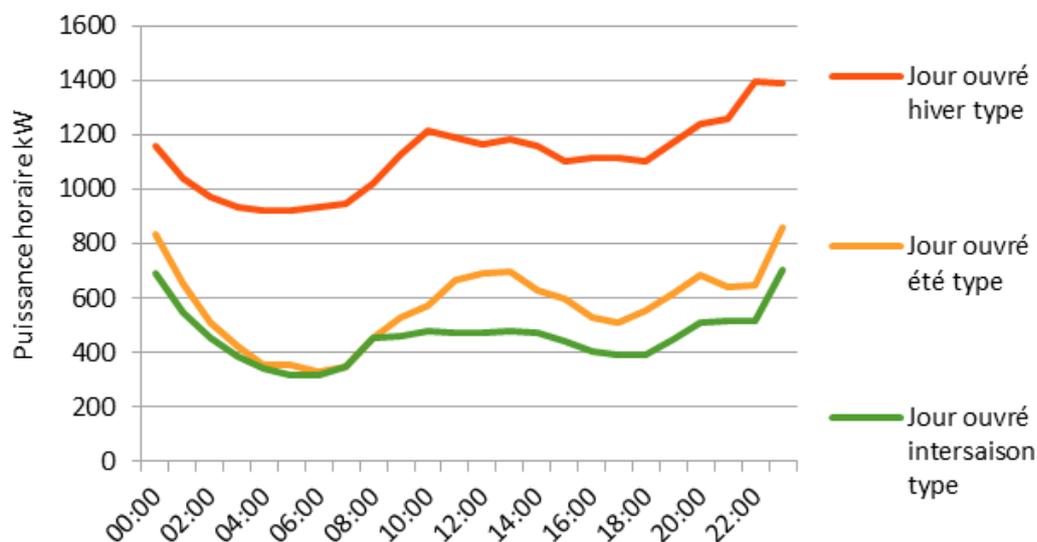


Figure 4 : Evolution de la consommation d'électricité moyenne journalière pour Janvier et Août



La variabilité des consommations est donc infra-journalière et saisonnière. La production de l'électricité par générateur au fuel est particulièrement adaptée à ces variations et permet de garantir une sécurité optimum de fourniture mais représente un coût et des émissions de polluants et de GES très important. Néanmoins, le contexte énergétique et climatique amène à réviser complètement ce modèle énergétique.

Le développement d'énergies renouvelables intermittentes, prévisibles (hydrolienne, biomasse...) ou non (photovoltaïque, éolien, ...) nécessaire pour se substituer au fuel entrainera un surdimensionnement très important avec des périodes excédentaires, notamment hors périodes de chauffage avec également un coût non négligeable.

La réduction des consommations énergétiques, notamment via l'isolation des bâtiments reste la piste primordiale pour l'atteinte des objectifs de 100% d'énergies renouvelables à l'horizon 2030 à un coût raisonnable.

L'importance des variations peut être diminuée par le stockage, le pilotage ou par des substitutions d'énergie.

3.3. Les solutions techniques possibles

3.3.1. Le stockage

Un stockage par batterie Li-Ion a été fait en 2017 par EDF-SEI, avec une capacité de 1MW et 500 kWh. Ce stockage a permis d'incorporer les premières unités de production d'énergie renouvelables sur le réseau électrique.

Au vu de la variabilité de la demande et l'importance des pics hivernaux, notamment en fin de journée, le stockage à déployer, dans le cas d'un mix énergétique selon le projet PHARES, est estimé à 300 MW, sans économie faite sur le chauffage l'hiver, et à 250 MW avec 50% d'économie sur le chauffage l'hiver. Economiquement et avec les technologies actuelles, le développement d'un stockage de cette ampleur n'est pas envisageable, et il faut donc associer une capacité de pilotage et de consommation dynamique en plus du stockage. Le stockage permettra de limiter l'écêtement journalier de la production renouvelable, mais ne permettra pas de stocker sur des périodes de l'ordre d'une saison.

Un stockage complémentaire est en préparation à hauteur de 1MW, dans le cadre du projet PHARES.

3.3.2. Le pilotage

Le pilotage des consommations sur l'île peut permettre une meilleure intégration des énergies renouvelables actuelles et futures. L'objectif est de double : de réduire les consommations en identifiant les consommations excédentaires inutiles (pilotage du chauffage dans des bâtiments qui ne sont pas utilisés en permanence) et en déplaçant des consommations sur les périodes où les productions renouvelables sont les plus importantes, ce qui permet de limiter les besoins en chauffage.

Pour Ouessant, l'idée est notamment de déplacer des consommations sur les périodes de production hydrolienne (intermittente mais prévisible) ou de créer de nouvelles sources de production d'énergie renouvelable pilotables (gazéification des déchets bois).

Pour le déplacement de ces consommations, plusieurs options sont envisagées :



- La tarification variable

A l'image de l'offre actuelle « heure creuse – heure pleine » disponible en France qui permet de déplacer des consommations (principalement chauffe-eaux) automatiquement par un signal envoyé aux compteurs électriques, l'idée est de définir plusieurs tarifs de l'électricité en fonction de la production. La construction du tarif pourra se baser sur différents critères comme par exemple le coût de production, ou encore l'intensité CO₂ du kWh consommé.

Ce système permettrait de décaler automatiquement des consommations type chauffe eaux, ou encore de décaler par l'intervention du consommateur des consommations telles que des machines à laver, four... L'argument tarifaire donne de fait un intérêt pour le consommateur à consommer aux moments les moins coûteux.

- Le pilotage automatisé

Cette option repose sur un pilotage automatisé, basé premièrement sur le rythme d'utilisation d'un équipement ou d'un bâtiment, et peut aussi intégrer une notion de pilotage en fonction de coûts de l'électricité ou d'un signal extérieur venant de la production.

Il s'agit par exemple de régler les consommations de chauffage sur le calendrier d'utilisation d'un bâtiment (jour/nuit, et semaine/week-end).

- L'information du consommateur (incitation non financière)

L'idée ici est de donner l'information au consommateur sur l'état du réseau électrique, en identifiant les périodes « favorables » et « défavorables ». Le pilotage n'est possible que par l'action volontaire du consommateur, et sans répercussion financière a priori, le décalage de consommation ne diminuant pas la quantité d'énergie consommée.

3.3.3. Les substitutions

La diminution des pics de consommation peut aussi se réaliser en substituant des énergies.

Dans ce cadre, pour Ouessant, des solutions de substitution de l'énergie électrique vers d'autres énergies sont envisagées : chauffage au bois, solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire (chauffe-eau thermodynamiques).

Ces solutions sont néanmoins fortement pénalisées par la péréquation tarifaire de l'énergie électrique, les surcoûts des équipements et les difficultés techniques liées à l'insularité. Leur apport est donc extrêmement limité.

Paradoxalement même, la qualité du système énergétique peut même être améliorée avec l'élargissement du périmètre électrique à la mobilité. En effet, le passage à une mobilité électrique sur l'île ne représente qu'un faible impact sur la consommation estimé à 2% à peine mais pourrait être une bonne réponse pour l'utilisation des excédents renouvelables non prévisibles (PV et éolien) que ce soit pour la recharge des véhicules sur l'île ou encore en lien avec un stockage hydrogène permettant une alimentation au moins partielle des bateaux assurant la traversée en été.



3.4. Les solutions sélectionnées

3.4.1. L'Energy management system + Stockage

- PC industriel (redondé) qui embarque des algorithmes de pilotage
- Interfacé (échanges d'informations et pilotage) avec :
 - Les différents producteurs renouvelables et la centrale thermique
 - Le système de stockage
 - Les flexibilités à venir
- Rôles de l'EMS :
 - Garant de l'équilibre offre-demande
 - S'assure que les services systèmes sont maintenus en permanence (en particulier qualité de fourniture et plan de protection)
 - Maximise la part EnR dans le mix énergétique
 - Peut éventuellement être amené à brider/déconnecter les producteurs EnR (rôle d'arbitrage entre les producteurs selon date de demande de raccordement)
 - Outil évolutif : ajout de nouveaux producteurs, nouvelles flexibilités, amélioration de l'optimisation (prévisions de consommation et de production)

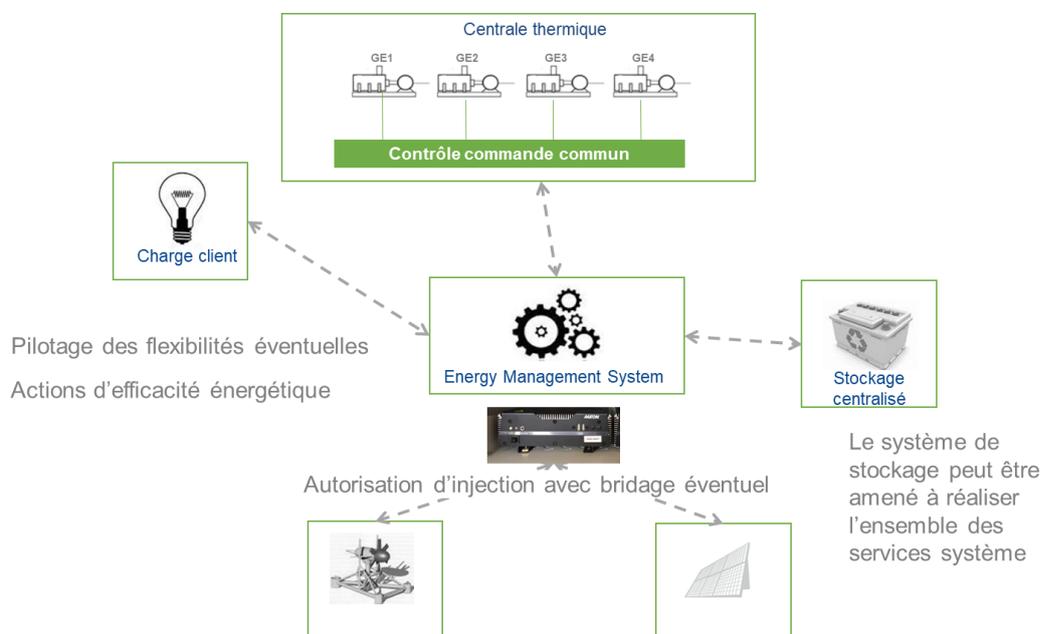


Figure 5 : Schéma de fonctionnement de l'EMS au sein du système électrique d'Ouessant



3.4.2. Le lissage de la production hydrolienne

Le lissage de la production électrique de l'hydrolienne est composé d'une batterie pouvant recevoir ou donner de l'électricité. Les contraintes imposées par le réseau sont d'avoir des variations de puissance inférieures à 5kW/s.

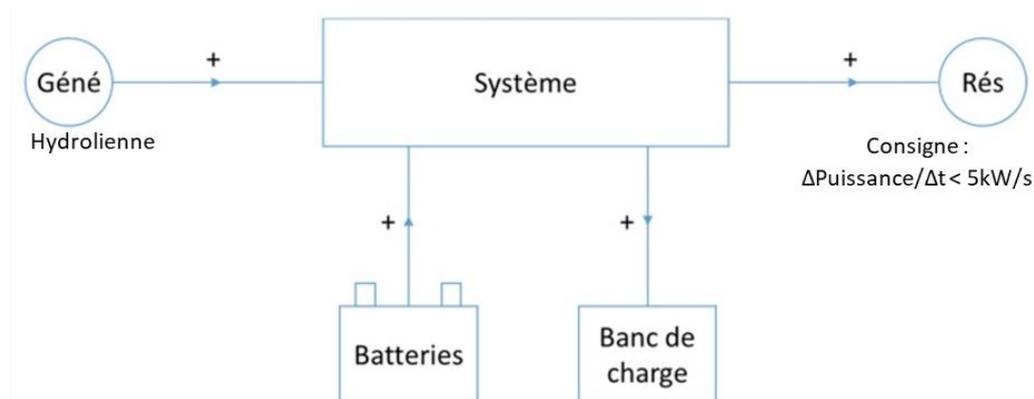


Figure 6 : Schéma de fonctionnement d'un système de lissage de l'hydrolienne

3.4.3. Le pilotage en aval des compteurs intelligents

L'île étant presque entièrement équipée de compteurs intelligents « Linky », le pilotage de la consommation peut être envisagé et affiné.

1°) Pilotage tarifaire

L'équipement des résidences de l'île de compteurs intelligents « Linky » (97% d'équipement) permet de gérer des systèmes tarifaires incitatifs adaptés à l'île. Ainsi en 2016, EDF SEI a pu décaler les tranches heures creuses et de les découper en 2 parties : une la nuit et l'après-midi. De ce fait, au lieu d'avoir la flotte entière d'équipement ECS qui se déclenche à 23h appelant 300kW, on se retrouve avec 2 vagues d'appels de puissance de plus faibles intensités (env 75-100kW). Cela permet aussi de décaler les consommations non-primordiales vers des périodes moins chargées, Ainsi, la même quantité d'énergie est fournie mais sur des périodes moins critiques offrant alors une marge de flexibilité pour le réseau.



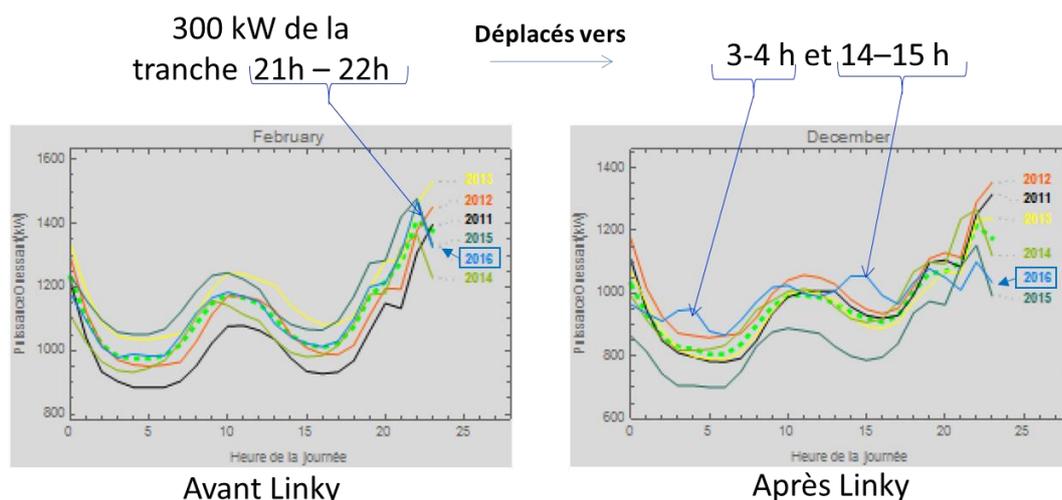


Figure 7 : Exemple du décalage des consommations des équipements ECS par décalage tranche "heure creuse"

De même, EDF-SEI va proposer une nouvelle répartition des heures creuses en lien avec la production hydrolienne. La plage nocturne sera donc flottante en fonction des marées permettant le déclenchement des consommations dans les périodes de production de l'hydrolienne.

2°) Le pilotage direct

Dans le cadre de ICE, deux modes de pilotage automatisés vont être utilisés. Le premier consiste à utiliser les fonctionnalités du compteur Linky pour piloter plus d'équipements et de manière affinée. La communication entre le compteur et les équipements passant par l'installation d'un émetteur sur le compteur et de récepteurs sur les équipements.

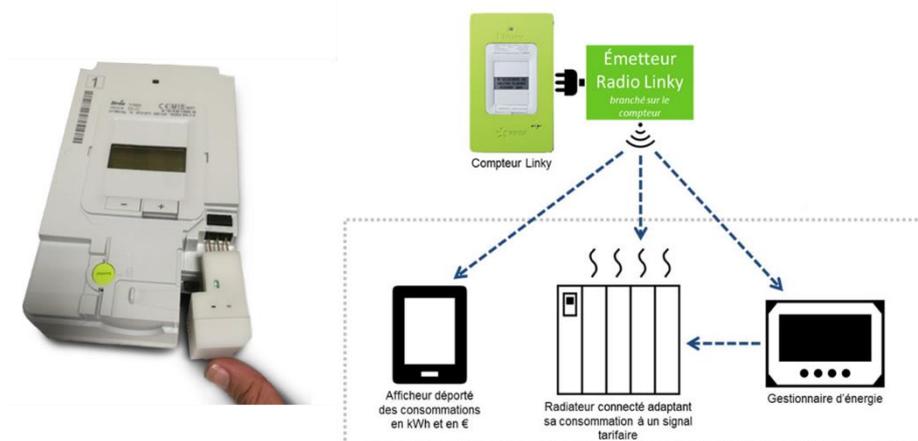


Figure 8 : Compteur Linky et un émetteur Radio (à gauche) - Principe de fonctionnement de l'ERL sur les équipements connectés du logement (à droite)

Le deuxième consiste en l'implantation sur l'île d'un système de télécommunication hertzien basé sur la technologie LoRa. Il permet de faire communiquer intelligemment l'Energy Management System et différents équipements ou applications par le biais d'un traitement des données sur une plateforme. Un tel système permet l'implantation de services de type smart city par des communications à bas débit recourant à des équipements autonomes ou très peu consommateurs. Une proposition d'architecture du système de pilotage en aval compteur est représentée en Figure 9.



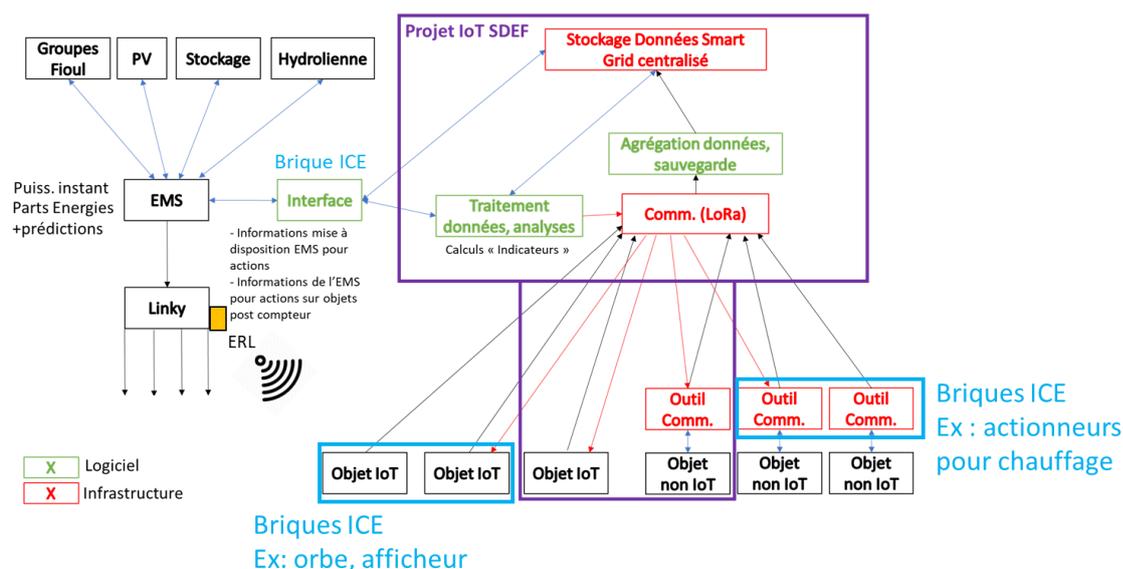


Figure 9 : Infrastructures et logiciels permettant d'agir sur les objets en aval des compteurs intelligents

Le périmètre en violet comprend les infrastructures et logiciels qui sont compris dans le projet IoT que le SDEF souhaite développer, à termes, à l'échelle du département du Finistère. Ce projet comprend notamment un axe sur l'efficacité énergétique des bâtiments publics, qui comprend une instrumentation afin d'effectuer un suivi des bâtiments et produire un audit précis des consommations. Les périmètres en bleu ciel représentent les briques technologiques spécifiques au projets ICE qui doivent être ajoutés en complément du projet IoT SDEF, notamment en ce qui concerne les actions chez les particuliers ou chez des entités privées.

3.4.4. Le changement des comportements : le consommateur

Pour cette action, nous avons proposé de mettre en place plusieurs outils permettant de donner des informations aux habitants, afin qu'ils puissent agir sur leurs consommations.

- Mise en place d'une application smartphone/internet sur l'énergie à Ouessant : reprise des consommations personnelles, état du réseau de Ouessant, éco'gestes, services d'alerte type EcoWatt
- Déployer des équipements dans les foyers pour mesurer et informer les ouessantins de leur propre consommation au regard de l'état du réseau. Eco-coaching.

Bénéfices : 100 MWhEF/an + Flexibilité

- Des économies pour les clients, plus de flexibilité pour le réseau
- Appropriation/sensibilisation aux enjeux énergétiques
- Aider le client à comprendre et programmer ses équipements
- Diminution de la pointe



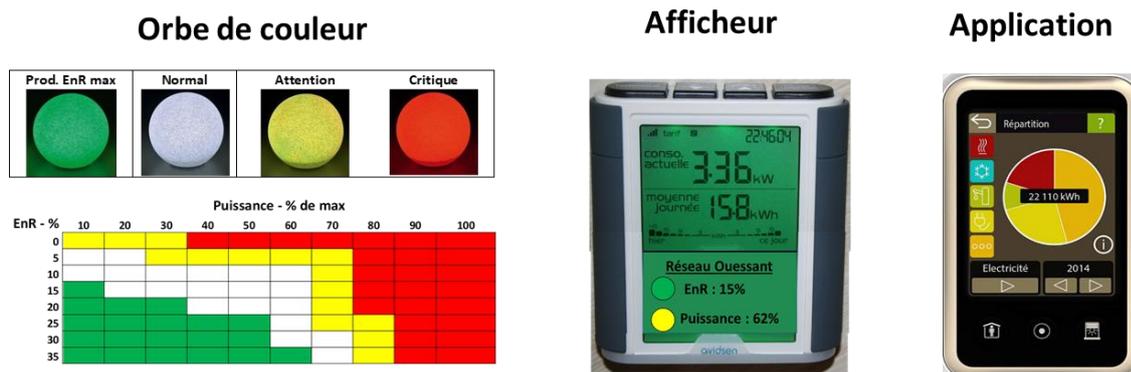


Figure 10 : Briques technologiques d'information du consommateur : orbe de couleur, afficheur et application smartphone

Nous proposons la mise en place de 3 types d'équipement permettant de proposer 3 niveaux d'information :

1. Un orbe de couleur : information simple et rapide de compréhension

L'orbe change de couleur en fonction de deux paramètres : la puissance totale appelée sur le réseau, et la part d'EnR dans le réseau. Les couleurs reprennent un code couleur simple (vert-jaune-rouge), donnant l'information du réseau dans le but que les consommations électriques pilotables par les habitants (machine à laver, lave-vaisselle) soient de préférence calées sur les périodes vertes et évitées sur les périodes rouges.

D'un point de vue technique, l'ordre du changement de couleur se fait par un message envoyé via l'infrastructure LoRa déployée sur l'île.

2. Un afficheur déporté : information détaillée et instantanée

L'afficheur reprend les consommations personnelles du logement en reprenant les informations du compteur électrique, et il affiche aussi l'état du réseau sur la base des critères de sélection de la couleur de l'orbe.

Cet afficheur reprend l'objectif d'un afficheur déporté dans les logements en précarité énergétique. Il existe des afficheurs pour les logements avec une installation électrique aux normes (classe RT2012). Par contre il n'y a pas de solution technique pour les logements plus anciens dont l'installation électrique n'est plus aux normes actuelles et nécessiterait une remise à niveau lourde.

3. L'application smartphone : information complète et production de graphiques et courbes de tendances.

L'application smartphone reprend les informations de l'afficheur (consommations personnelles du logement, et état du réseau) mais contient aussi des messages type EcoWatt avec des alertes ou de la prévention lors de pics de consommations ou encore des messages d'information.



4. Université d'East Anglia

4.1. Contexte

L'Université d'East Anglia est une université publique de recherche située à l'ouest de Norwich, à l'est de l'Angleterre. Elle a été créée en 1963 sur un campus de 320 acres (1,3 km²). Elle comptait 18 035 étudiants inscrits pour l'année universitaire 2019/2020 et plus de 4 000 employés à temps plein et à temps partiel.

L'UEA comprend un grand nombre de bâtiments d'âge et de maturité technologique variables. La figure ci-dessous montre les principaux bâtiments du campus de l'UEA. Le campus principal a été construit dans les années 1960 et des bâtiments plus récents ont été construits au cours des deux dernières décennies. Il y a aussi un bâtiment historique (Earlham Hall) du 17^{ème} siècle qui est actuellement utilisé par l'UEA Law School.



Figure 11 Main Buildings on UEA campus

Depuis mars 2020, le campus universitaire est beaucoup moins utilisé que la normale en raison de la pandémie de COVID-19. Cela comprenait la plupart du personnel académique, administratif et de soutien travaillant à domicile et la plupart des activités d'enseignement et de recherche se déroulant à distance.

À partir de l'année universitaire 2021/22, l'UEA se lancera dans un projet à grande échelle et à long terme de rénovation en profondeur du campus des années 1960. Il s'agit d'une étape de décarbonation essentielle mais difficile pour l'Université. Cette partie plus ancienne du campus n'est pas construite avec des normes d'efficacité modernes et en raison de son architecture brutaliste unique, elle est protégée. En conséquence, sa rénovation est un processus particulièrement sensible, mais nécessaire à l'UEA pour atteindre ses objectifs d'émissions ambitieux.



4.2 Les Enjeux et contraintes de l'UEA

4.2.1. Consommation énergétique

Il existe trois types de services énergétiques sur le campus principal et les villages étudiants de l'UEA, notamment le chauffage, le refroidissement et l'alimentation électrique, ce qui permet à son tour de nombreuses utilisations selon les besoins. Ces services énergétiques sont principalement fournis par le gaz naturel via des centrales de cogénération (CHP) localisées, des importations d'électricité du réseau électrique ainsi que la production d'électricité localisée avec des sources d'énergie renouvelables. De plus, une petite fraction des services de chauffage et d'eau chaude est fournie par des chaudières à gaz locales dans les bâtiments. Dans cette section, nous nous concentrons sur la consommation de deux sources d'énergie qui fournissent les services énergétiques ci-dessus à l'UEA, à savoir le gaz naturel et l'électricité.

4.2.1.1. Consommation de gaz naturel à UEA

Le gaz naturel est la principale source d'énergie à l'UEA. La consommation annuelle de gaz est d'environ 80 000 MWh depuis 2017. Si les plans optionnels pour de nouveaux bâtiments se concrétisent, il est prévu que la consommation de gaz passera à plus de 90 000 MWh d'ici 2035 en raison de la demande supplémentaire d'électricité, de chauffage et de refroidissement. Il est toutefois important de mentionner que de tels plans (pour les nouveaux bâtiments) ne sont pas actuellement envisagés, en particulier dans le cadre de l'évaluation des espaces et des modes de travail post-COVID. À UEA, le gaz est principalement utilisé pour alimenter les centrales de cogénération qui produisent la majorité de l'électricité et du chauffage à UEA. Les autres utilisations du gaz telles que les chaudières à gaz dans des bâtiments spécifiques, l'utilisation universitaire, la blanchisserie et la restauration représentent environ 5 % de la consommation totale de gaz. La figure ci-dessous montre la demande de gaz existante et projetée selon l'état du bâtiment. La limite de capacité de gaz représente la fourniture de gaz convenue entre l'UEA et son fournisseur. Si une capacité gazière supplémentaire était nécessaire, il faudrait un nouvel accord sur la capacité d'approvisionnement entre l'UEA et son fournisseur de gaz (actuellement Gazprom en tant que grossiste) et une éventuelle mise à niveau de l'infrastructure gazière locale.

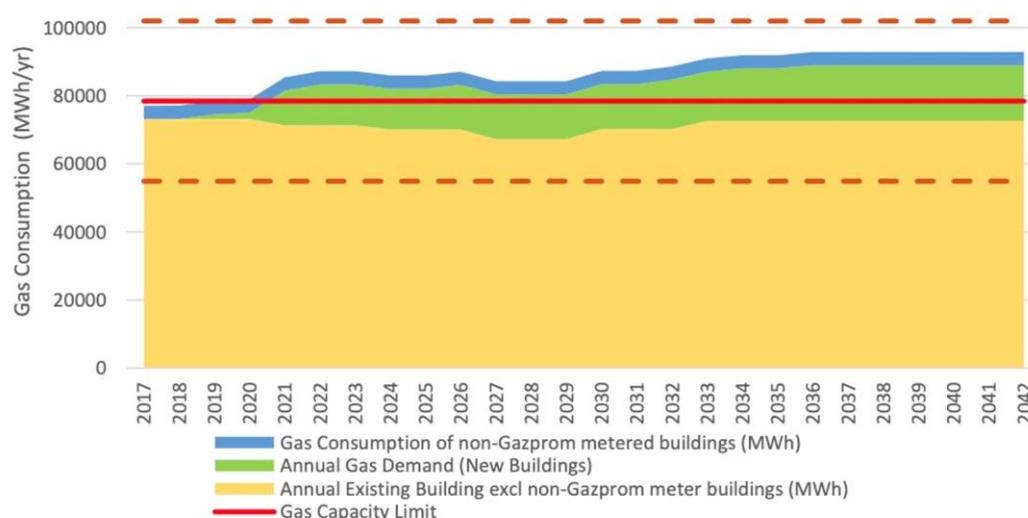


Figure 12 Consommation annuelle de gaz naturel selon le type de bâtiments



4.2.1.2. Consommation d'électricité à UEA

L'autre type de services énergétiques est l'utilisation d'électricité à l'UEA avec une consommation annuelle d'électricité atteignant plus de 27 GWh. La figure ci dessous montre une répartition de la consommation annuelle d'électricité par différents usages : 63 % de l'électricité est consommée à des fins académiques, y compris l'enseignement, la recherche et d'autres activités liées à l'administration. La consommation d'électricité résidentielle (pour les logements étudiants) représente 23 % de la consommation totale d'électricité. Le Sportspark (centre d'équipements sportifs de l'UEA) est responsable de 8%, tandis que les services techniques (4%) et la restauration (2%) représentent le reste de la consommation d'électricité.

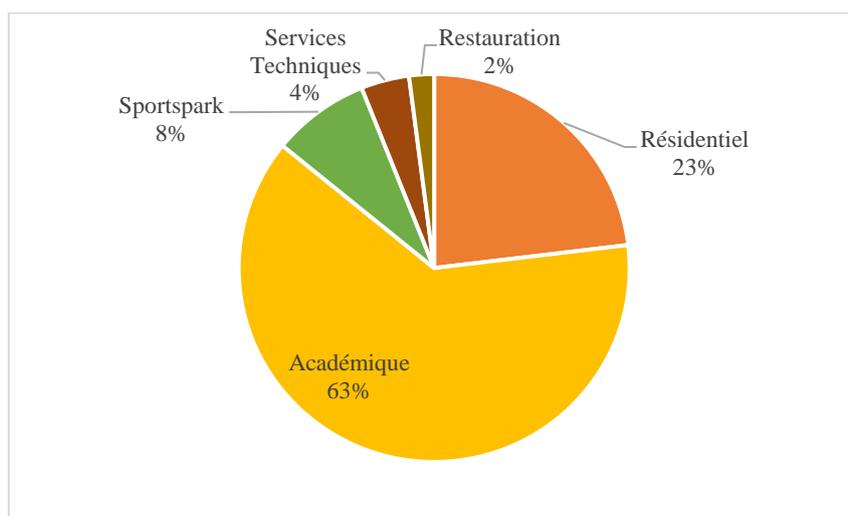


Figure 13 Une répartition de la consommation d'électricité par secteurs - UEA

La consommation de chaleur et d'électricité a connu une réduction significative dans différents types de bâtiments en raison de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de l'adoption de nouvelles technologies. Le tableau 1 résume l'évolution de la consommation de chaleur et d'électricité dans les bâtiments résidentiels, universitaires, Sportspark, de soutien et de restauration au cours des trois dernières années. Il montre que dans la plupart des bâtiments, les consommations de chaleur et d'électricité ont été réduites de plus de 10 %, à l'exception de la réduction de la consommation de chaleur dans les bâtiments de soutien (réduction de 9 %).

Tableau 3 : Changements dans la consommation de chaleur et d'électricité dans différents types de bâtiments

	Chauffage	Electricité
Résidentiel	-20%	-12%
Académique	-13%	-14%
Sportspark	-29%	-17%
Services Techniques	-9%	-32%
Restauration	-30%	-22%



4.2.2 Approvisionnement en énergies

L'approvisionnement énergétique de l'UEA est assuré par trois sources principales en général, dont trois unités de cogénération (deux unités de 2,0 MWe construites en 2017 et une unité de 1,7 MWe avec une année de construction antérieure), 18 MW de chaudières à gaz réparties dans différents bâtiments et 225 kW de système solaire photovoltaïque (PV). Outre les sources de production d'énergie domestiques, l'Université importe également de l'électricité et du gaz du réseau national.

Les heures de fonctionnement annuelles moyennes de ses principales unités de production d'énergie sont respectivement de 3 388 heures/an pour les unités de cogénération et de 1 213 heures/an pour le système solaire photovoltaïque. Leur production d'électricité associée est respectivement de 19,3 GWh à partir de la cogénération et de 0,273 GWh à partir des panneaux solaires photovoltaïques, et donc la majorité de la production d'électricité se fait via le système de cogénération à gaz. Le reste de l'approvisionnement en électricité est tiré du réseau (environ 8,3 GWh soit 30% de la consommation totale d'électricité). La centrale de cogénération utilise essentiellement ses principaux moteurs (moteurs à combustion interne fonctionnant au gaz naturel) pour produire de l'électricité. Ces moteurs, comme tous les moteurs à combustion interne, ont une quantité importante de production de chaleur qui n'est pas convertie en électricité, et doit être évacuée de l'usine. Ceci est normalement réalisé par un système de refroidissement qui peut transférer l'excès de chaleur à l'environnement, cependant, dans une centrale de cogénération, cet excès de chaleur est plutôt valorisé, par exemple pour du chauffage urbain. Pour que cette combinaison soit opérationnelle, la demande d'électricité et de chaleur doit coïncider.

À l'occasion, la centrale de cogénération doit augmenter sa production d'électricité pour répondre à la demande de pointe quotidienne. Ceci afin d'éviter les frais supplémentaires de « Red Distribute Network Operator (DNO) » à ce moment de la journée ; il s'agit d'une pénalité que le DNO facture aux gros consommateurs lorsqu'ils demandent de l'électricité pendant les heures de forte demande globale. L'augmentation de l'approvisionnement en électricité peut entraîner une production de chaleur excessive si la chaleur n'est pas requise en même temps que l'électricité est requise. À cette fin, en plus de la cogénération, l'UEA a investi dans la technologie de stockage de chaleur sous la forme de cuves à eau chaude. Par conséquent, une partie de la production de chaleur excessive est stockée dans le magasin thermique sur le campus, mais même avec ce système, une partie importante de la chaleur est évacuée par l'échappement. La chaleur dégagée et perdue représente généralement plus de 5 % de l'apport total de chaleur. Par exemple, entre novembre 2016 et octobre 2017, la production totale de chaleur s'élevait à 39,6 GWh, dont 2,3 GWh estimés perdus.

L'université avait un plan pour installer une usine de gazéification de biomasse dans le cadre de son programme de réduction de carbone. Cependant, le gazéifieur de copeaux de bois a été mis hors service en raison de problèmes opérationnels liés à la technologie. Étant donné que les 5,7 MW existants d'unités de cogénération sont considérés comme suffisants pour répondre à la demande existante et il n'est pas prévu d'étendre davantage la flotte de cogénération dans un proche avenir. Cependant, il est prévu que la demande maximale d'électricité passera de 7,1 MW actuellement à 12,2 MW en 2050, en partie en raison des éventuels nouveaux bâtiments, de l'installation de chargeurs de véhicules électriques et d'une éventuelle électrification thermique. La demande supplémentaire doit être satisfaite par le développement de sources d'énergie alternatives, telles que les énergies renouvelables, l'hydrogène et les batteries. Dans le même temps, l'université devra innover dans la coordination de l'offre et de la demande d'énergie, compte tenu de la nature de production stochastique des sources d'énergie à faible émission de carbone. Bien que les technologies de stockage mentionnées ci-dessus (telles que l'hydrogène, les batteries et le stockage de chaleur) soient précieuses, il est nécessaire de contrôler la demande d'énergie des utilisateurs



d'énergie du campus. L'UEA est déjà avancée dans le domaine plus large de la réponse à la demande avec une expérience significative des applications de réponse en fréquence sur le campus. 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, des étudiants et des employés.

4.2.3 Variabilités

4.2.3.1 Variabilité de la consommation de gaz

Compte tenu du rôle du gaz dans l'approvisionnement en chaleur, il existe d'importantes variations saisonnières de la consommation de gaz. Le pic se produit naturellement en hiver lorsque la demande de chauffage est élevée, ce qui représente environ 70 % de la demande de chauffage annuelle totale tout au long de l'année. Par exemple, la consommation horaire de gaz la plus élevée a été enregistrée le 24 février 2018. La consommation totale de gaz a atteint 29 187 kWh ce jour-là. La consommation pendant les vacances d'été (entre la mi-mai et la mi-septembre) est relativement plus faible puisque la demande de chauffage pendant les mois les plus chauds représente environ 30 % de la demande totale de chauffage d'une année.

Bien que le chauffage urbain fourni par les centrales de cogénération représente la majorité de l'approvisionnement en chauffage, tous les bâtiments ne sont pas connectés à ce système. C'est pourquoi il existe également des chaudières locales à gaz installées dans les bâtiments pour assurer les services de chauffage. La figure ci-dessous représente la consommation de gaz dans chaque bâtiment du campus entre 2016 et 2017. Le Centre de recherche biomédicale représentait environ 50 % de la consommation de gaz dans les bâtiments en raison des chaudières à vapeur situées dans le bâtiment. À l'instar de la tendance générale de la consommation, la consommation de gaz dans les bâtiments a connu une variation saisonnière importante, qui a connu une forte baisse à partir de mai avant d'augmenter en septembre.

Bien que la majorité du gaz naturel soit utilisé à des fins énergétiques directes, une faible proportion du gaz est utilisée pour les services de restauration au Restaurant Building, Sportspark, Village, Constable Terrace, INTO, Health and Community Centre et Sainsbury Centre. On estime que la consommation annuelle pour la restauration est d'environ 415 MWh, ce qui représente 0,5% de la consommation totale de gaz à l'UEA. Comme le montre la figure ci-dessous, ces bâtiments présentent un modèle de consommation légèrement différent, qui ne suit pas les variations saisonnières de la consommation totale de gaz.



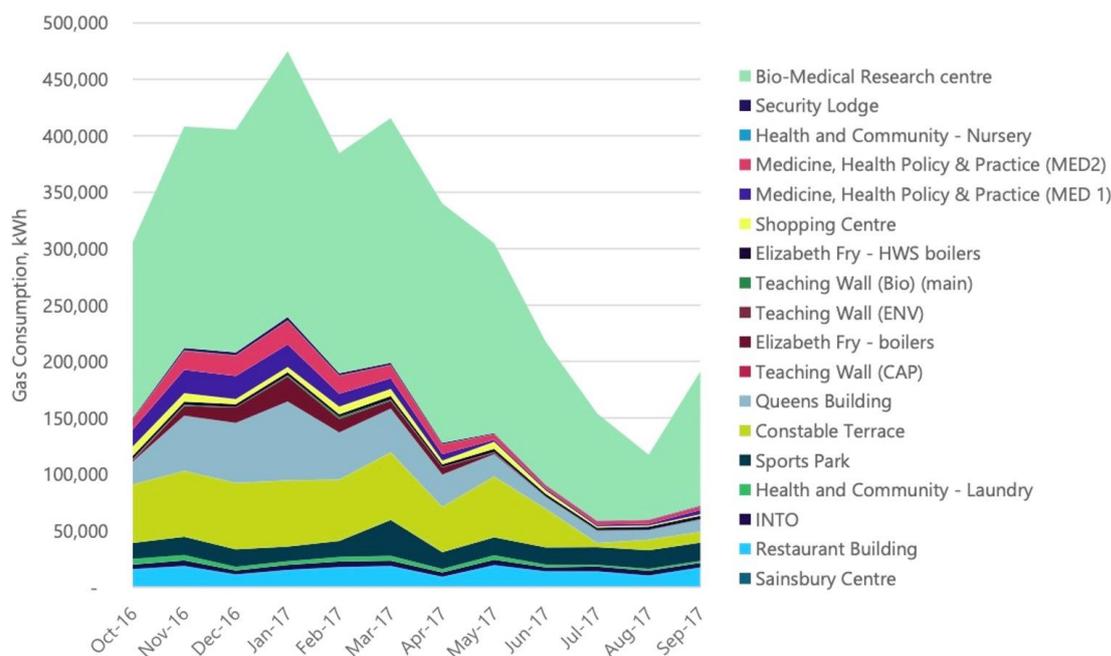


Figure 14 Données gaz du bâtiment – mensuel 2016 – 2017

4.2.3.2. Variabilité de la consommation d'électricité

Les variations saisonnières de la consommation d'électricité ne sont pas significatives par rapport à la consommation de gaz et sont similaires pour toutes les années. Elles sont importantes en ce qui concerne l'utilisation de sources d'énergie à faible teneur en carbone et renouvelable intermittentes, principalement l'énergie solaire. En effet, l'énergie solaire est très saisonnière et culmine pendant les mois d'été, lorsque la demande est plus faible. L'énergie éolienne, quant à elle, atteint un pic pendant les mois d'hiver, ce qui correspondrait au modèle de demande d'énergie de l'UEA. Cela pourrait être exploité par des contrats distincts pour l'approvisionnement en énergie éolienne. En moyenne, 52% de la consommation d'électricité se produit en hiver, tandis que 48% de l'électricité est consommée en été.

La figure ci-dessous montre la demande annuelle d'électricité sur le campus de l'UEA au cours d'une année type (en particulier entre 2016 et 2017). Une demande de pointe de 6,8 MW a été observée le 20 février 2017, en partie en raison de la maintenance du système des centrales de cogénération qui a réduit l'approvisionnement en eau chaude et augmenté la demande des ballons d'eau chaude électriques dans les bâtiments. En général, toutes les pointes de demande supérieures à 5,5 MW survenues en hiver sont plus souvent attribuées à une demande d'énergie inhabituelle.

La demande de pointe en été est beaucoup plus faible et moins fréquente par rapport à la demande de pointe en hiver. Notamment, dans le cycle annuel, il y a une baisse significative de la demande pendant les vacances de Noël et de Pâques et globalement, la consommation d'énergie est plus élevée en hiver qu'en été. Cela reflète le nombre d'étudiants sur le campus et le niveau d'activité académique. Bien que très peu d'activités se produisent pendant les vacances de Noël et qu'un nombre inférieur d'étudiants et de membres du personnel restent sur le campus pendant l'été, la consommation globale est inférieure à celle de toute autre partie de l'année.





Figure 15 Demande électrique annuelle mesurée sur le campus en kW.

Outre les variations saisonnières, la consommation d'électricité présente également des variations quotidiennes. La figure ci-dessous montre la demande de pointe quotidienne un jour typique de novembre. Ces effets de variation sont particulièrement importants pour l'utilisation accrue d'énergies renouvelables (à la fois solaire et éolienne) sur le campus. Faire correspondre la demande avec l'approvisionnement en énergie renouvelable est essentiel et difficile sans l'utilisation d'une capacité de stockage d'électricité importante. Les pics de consommation se situent entre 16h et 20h, ce qui est très similaire à la période de pic de consommation du système électrique en général (hors université, au niveau national). Outre le pic en fin d'après-midi, il y a également eu une augmentation notable en début d'après-midi entre 13h et 14h. L'augmentation de la demande est due au grand nombre de logements résidentiels sur le campus. La plupart des étudiants terminent les cours et arrivent à leur logement à cette heure. Les appareils ménagers tels que les téléviseurs, les ordinateurs et, surtout, les équipements de cuisine sont allumés à ce moment. Par ailleurs, les services d'éclairage du Sportspark contribuent également à l'augmentation de ces heures de pointe. On estime que le pic est d'environ 500 kW en moyenne. Il existe également des différences significatives dans la consommation d'électricité entre la semaine et le week-end, la demande étant d'environ 20 % inférieure le week-end pendant la journée.



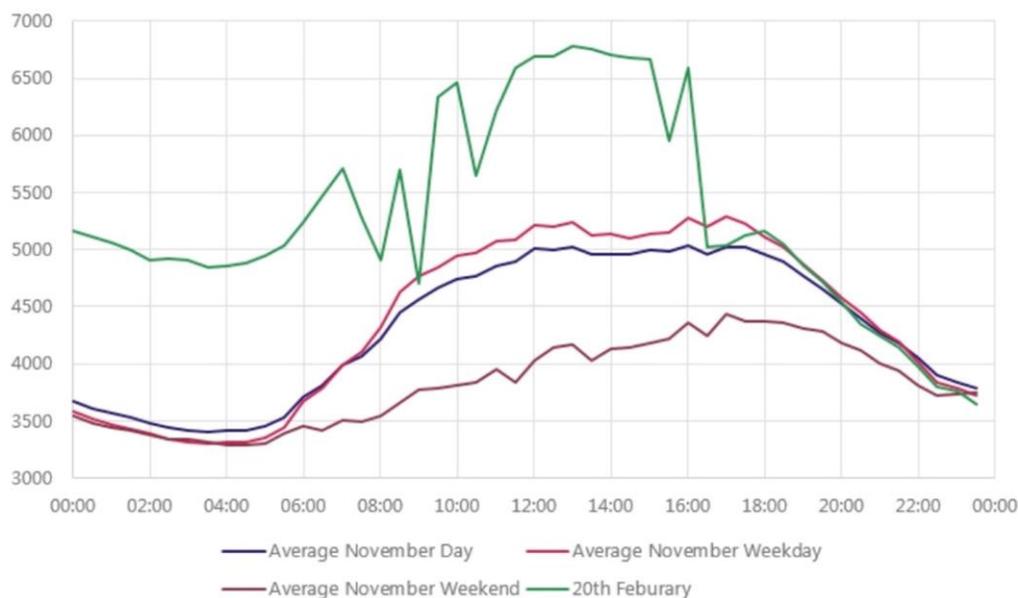


Figure 16 Demande électrique du campus une journée type de novembre et le 20 février 2017 en kW

Un aspect supplémentaire abordé dans la figure est la courbe de demande d'électricité pour le 20 février 2017. Elle montre un modèle de demande très différent, dans lequel la demande d'électricité a atteint son pic vers midi et a considérablement diminué après 16 heures. Comme mentionné ci-dessus, cela était dû à la maintenance du système de cogénération qui a augmenté le besoin de radiateurs électriques. Bien que cet exemple soit relativement isolé, il met en évidence à quel point le système énergétique de l'UEA repose, à l'heure actuelle, sur le système de cogénération et est impacté par le comportement des utilisateurs d'énergie sur le campus. Une réduction de chaleur par l'approvisionnement normal de cogénération a entraîné une augmentation rapide de la charge électrique pour couvrir cette demande de chaleur. Cela soulève la question de la capacité du système à, non seulement contrôler l'approvisionnement en énergie, mais également la demande d'énergie via un protocole automatisé ou semi-automatisé.

4.2.4. Autres défis et opportunités

4.2.4.1. L'objectif de neutralité carbone de l'UEA

L'UEA a travaillé sur sa stratégie bas carbone pour devenir neutre en carbone avant 2050 (le Plan Net Zero). Le Plan commence par une estimation du bilan carbone pour atteindre le zéro net, ce qui est conforme au bilan carbone mondial pour limiter l'augmentation de la température sous la barre des 2°C d'ici 2050.

Le bilan carbone de l'UEA est estimé à 147kT/an de CO₂, y compris les émissions de CO₂ des étudiants ne résidant pas sur le campus (environ 10 000 personnes). L'estimation est basée sur la distribution proportionnelle de ses niveaux d'émissions correspondant aux émissions de CO₂ liées à l'énergie de Norwich (l'UEA représente 4% des émissions de CO₂ liées à l'énergie de Norwich). La figure ci-dessous montre les émissions historiques liées aux bâtiments et les émissions futures recommandées afin d'atteindre le zéro



net à l'UEA avant 2050. À l'heure actuelle, les émissions liées aux bâtiments représentent les quatre cinquièmes des émissions totales de l'Université.

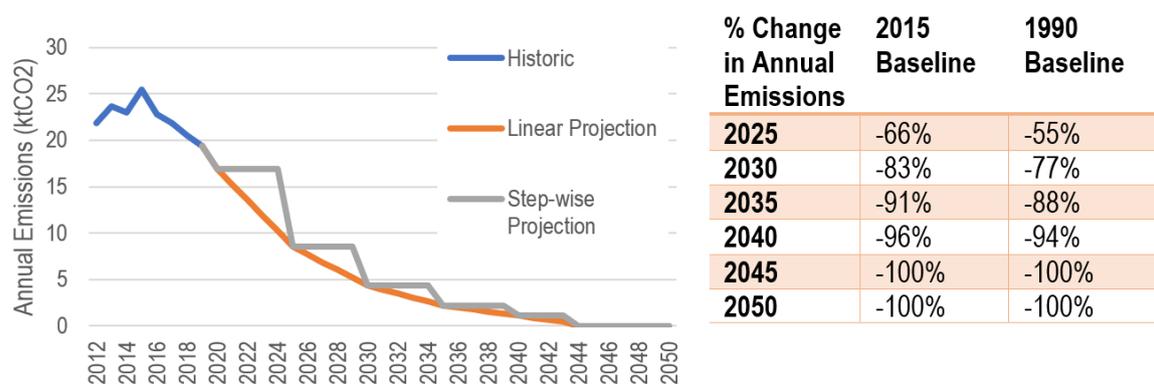


Figure 17 Projections du budget carbone de l'utilisation de l'énergie liée aux bâtiments de l'UEA

La mise en œuvre d'un plan neutre en carbone peut avoir des implications importantes sur la stratégie énergétique. L'université devra mettre en œuvre des mesures pour réduire sa dépendance à l'égard de la centrale de cogénération, augmenter le déploiement de sources d'énergie renouvelables, intégrer des unités plus flexibles telles que le système de stockage par batterie, ce qui nécessitera des investissements importants et une planification minutieuse.

4.2.4.2 Rénovation des Bâtiments – Une opportunité

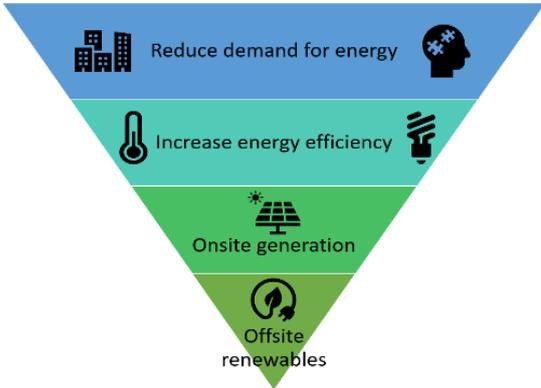
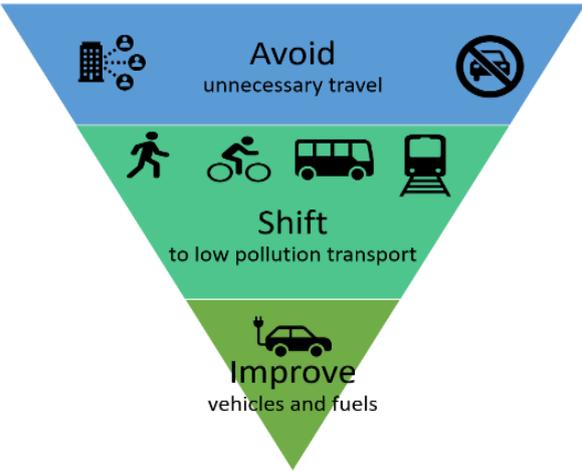
Le campus de l'Université d'East Anglia vient de se lancer dans un important projet de rénovation de bâtiment. Cela concerne toutes les zones des principaux espaces d'enseignement, de recherche et de bureau du campus qui ont été construits à l'origine lors de la création de l'université (années 1960). Tous les bâtiments de cette génération ont reçu le statut de protection des autorités britanniques pour leur architecture moderniste / brutaliste unique (supervisée par Sir Denys Lasdun). En conséquence directe de leur statut, l'apparence extérieure de ces bâtiments ne peut pas être modifiée et l'UEA est responsable de leur maintien en bon état et en bon aspect. Cependant, ces bâtiments ont maintenant plus de 60 ans et ont besoin d'être modernisés selon les normes actuelles. De toute évidence, cette situation présente à la fois un défi et une opportunité pour l'UEA. Tout d'abord, le défi est que les bâtiments ont des fenêtres à simple vitrage, des châssis de fenêtres qui ne sont pas étanches aux courants d'air et qu'il n'y a pas d'isolation thermique le long des structures principales. En même temps, leur esthétique doit être préservée, y compris la taille des encadrements de fenêtres et les facettes de béton nu des bâtiments. La politique de l'université pour atteindre les émissions nettes zéro est tout à fait irréalisable avec ces bâtiments dans leur état actuel. Cependant, comme l'université a maintenant adopté un plan de rénovation majeure, cela représente une excellente opportunité d'innovations qui aidera à fournir des normes de durabilité de premier plan en matière d'efficacité énergétique, de conception énergétique intelligente et au-delà.

4.3 Les solutions techniques possibles

Le plan zéro net de l'UEA comprend des mesures pour atteindre l'objectif de devenir neutre en carbone d'ici 2050. Ces mesures sont résumées dans la figure 8 ci-dessous. Outre la consommation d'énergie liée aux bâtiments (y compris la demande d'électricité, de chauffage et de refroidissement), les émissions liées aux déplacements (y compris l'utilisation de voitures particulières par les employés et les déplacements en



avion), et la gestion de la biodiversité et de l'utilisation des sols (y compris les opportunités d'améliorer la biodiversité et les puits de carbone) sont également abordés dans les voies clés pour atteindre zéro émission de carbone.

<p>Pour l'utilisation de l'énergie liée au bâtiment, l'UEA présente des mesures selon l'approche de gestion de l'énergie. Les mesures visant à réduire la demande comprennent la consolidation de l'espace et le changement de comportement (un élément central du travail de démonstration du projet Intelligent Community Energy - ICE à l'UEA) ; les mesures visant à accroître l'efficacité énergétique comprennent l'isolation des bâtiments, l'efficacité énergétique et la régulation de la température (un élément central du projet ICE à l'UEA) ; la production et le stockage d'électricité sur site offrent des moyens supplémentaires de réduire les émissions renforçant davantage la capacité du campus à fonctionner comme un territoire énergétique isolé ; La production d'énergies renouvelables hors site peut contribuer davantage à atteindre le zéro net, en particulier parce qu'elle donne accès aux développements éoliens offshore situés près de la côte de Norfolk, à proximité de l'UEA et de Norwich.</p>	 <p>Atelier de réduction des émissions des bâtiments du campus</p>
 <p>Atelier de réduction des émissions liées aux déplacements</p>	<p>Pour les émissions liées aux déplacements, l'UEA utilise le cadre Éviter-Décaler-Améliorer. Les mesures pour éviter les déplacements comprennent le travail à distance et l'interdiction des voitures à occupation simple et/ou à combustible fossile, lorsque l'utilisation de véhicules privés est jugée nécessaire. Le passage à des modes de mobilité plus durables consiste à encourager la marche, le vélo et les déplacements actifs. De plus, augmenter l'accès aux transports publics pour les trajets domicile-travail et déplacer les vols court-courriers vers le rail lorsque cela est possible dans les voyages au Royaume-Uni et en Europe. L'amélioration des véhicules et des carburants fait généralement référence à l'augmentation de l'utilisation des bus et des voitures électriques sur le campus. Les données sont également cruciales pour permettre à la fois des choix de voyage « plus écologiques » et pour suivre les progrès. C'est en particulier l'offre future d'électromobilité (véhicules particuliers, vélos et même bus) qui nécessitera une certaine charge de campus qui</p>



	nécessitera une production accrue d'électricité à faible émission de carbone.
<p>Pour la biodiversité et la gestion de l'utilisation des terres, plusieurs opportunités ont été identifiées pour améliorer la biodiversité et le puits de carbone de l'UEA, d'où un moyen important de réduire la contribution du campus aux émissions à effets de serre. Il s'agissait principalement d'assurer un personnel et des niveaux de ressources adéquats ; travailler avec des partenaires locaux et des groupes de bénévoles; identifier les opportunités de compensations de biodiversité au sein du système de planification ; protéger et améliorer les habitats locaux; gérer l'accès des utilisateurs et usages concurrents, comme les promeneurs de chiens, la pêche récréative et le cyclisme ; La gestion de l'accès pourrait également être améliorée en augmentant l'éducation et la sensibilisation de la communauté au sens large concernant la valeur et la conservation de la biodiversité locale ; Surveiller les progrès au moyen d'enquêtes annuelles est essentiel pour assurer la continuité de la mise en œuvre.</p>	 <p>Atelier d'amélioration de la biodiversité</p>

Figure 18 Résumé des domaines ciblés pour atteindre l'objectif net zéro à l'UEA.

4.3.1 Solutions énergétiques liées aux bâtiments

En consultation avec les principales parties prenantes, l'UEA a proposé plusieurs mesures clés pour chacun des trois principaux domaines ciblés mentionnés ci-dessus. Par exemple, en termes de réduction des émissions énergétiques liées aux bâtiments, il introduit le remplacement de la centrale existante par des pompes à chaleur et de l'hydrogène pour le chauffage. Un tel remplacement peut réduire la consommation de gaz, ce qui sera nécessaire pour que l'UEA atteigne son objectif de zéro net avant 2050. Il introduit également l'installation de panneaux solaires photovoltaïques et potentiellement d'éoliennes (ou l'approvisionnement direct en énergie éolienne) en combinaison avec des systèmes de stockage de batteries. Cela permet de réduire efficacement la consommation de gaz des centrales de cogénération et d'assurer un approvisionnement fiable en électricité des bâtiments.

Un parcours narratif pour la consommation d'énergie liée au bâtiment est illustré à la figure ci-dessous. Outre les mesures du côté de la production d'énergie, il introduit également des mesures du côté de la demande, y compris le changement de comportement et l'engagement dans la consommation d'énergie, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'adoption de technologies énergétiques intelligentes, ainsi que l'introduction de la conception de bâtiments à haut rendement et à faible demande énergétique, un domaine dans lequel l'UEA a été pionnière à de multiples occasions auparavant.



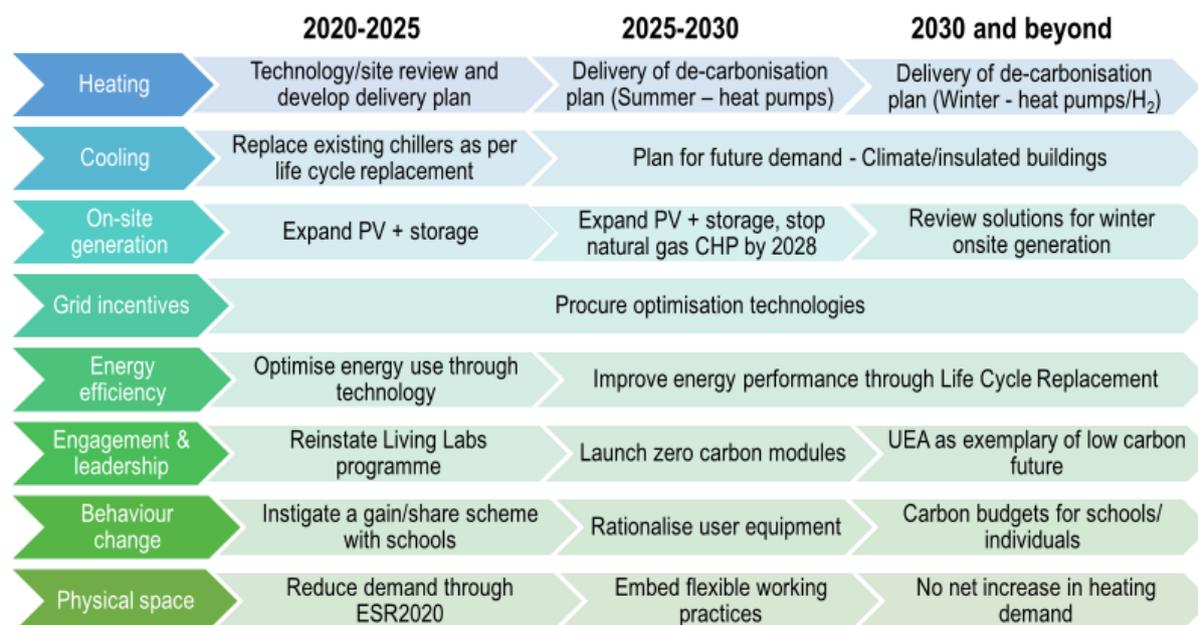


Figure 19: Parcours narratif de la consommation énergétique liée au bâtiment

4.3.2 Solutions énergétiques liées aux déplacements

Outre la réduction des émissions liées aux bâtiments, l'UEA met également en place 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.

L'une des mesures les plus importantes pour réduire les émissions liées aux déplacements est l'adoption de véhicules électriques. Il comprend à la fois l'utilisation de véhicules électriques privés par les employés de l'UEA et le remplacement de la flotte des domaines par des véhicules électriques. Un tel changement induira la nécessité d'une nouvelle infrastructure de recharge. L'université a envisagé d'ajouter la recharge des véhicules électriques à un cinquième de ses espaces de stationnement, conformément au plan de Londres sur les politiques de planification liées aux véhicules électriques. Cela signifie que 220 nouveaux chargeurs de véhicules électriques devront être installés d'ici 2040. On estime que 15 % de tous les véhicules électriques (ou 93 véhicules électriques au total) seront chargés sur le campus pendant la période de pointe de la demande. Avec 20 % d'entre eux en charge rapide (50 kW) et 80 % d'entre eux en charge lente (15 kW), il conduira à une augmentation de la demande de pointe d'environ 2 MW. Il est toutefois prévu que de nouveaux modèles commerciaux et de tarification puissent émerger dans ce domaine, résultant dans une puissance de pointe différente. Étant donné que la recharge de nuit peut être très rentable avec les tarifs selon le temps d'utilisation (ToU pour Time of Use) au Royaume-Uni, même parfois en payant les clients pour utiliser l'électricité, il est prévu que les utilisateurs du campus de l'UEA rechargeront leurs véhicules à domicile. Ensuite, leurs véhicules entièrement chargés seront des batteries mobiles, disponibles sur le campus pour les activités Vehicle to Grid (V2G) et Vehicle to Building (V2B) en supposant une tarification attractive. Cela aiderait à répondre aux besoins énergétiques du campus pendant la pointe de l'après-midi/soirée.



Un parcours narratif est présenté à la figure ci-dessous. Il montre huit domaines ciblés, qui répondent aux besoins d'amélioration de l'efficacité énergétique, de réduction de la consommation d'énergie, ainsi que de transition des combustibles vers des sources d'énergie renouvelables.



Figure 20 Parcours narratif pour réduire les émissions des déplacements de l'UEA

4.4 Solutions retenues

Au cours d'une journée type, la demande de pointe en électricité se produit entre 13h et 14h et entre 16h et 20h à l'UEA. Lorsque la demande dépasse la limite de capacité convenue pendant les heures de pointe, l'UEA doit payer des frais supplémentaires pour consommer l'électricité du réseau. La solution actuelle consiste à augmenter les puissances de sortie des unités de cogénération pour répondre à l'augmentation de la demande pendant les périodes de pointe de demande. Cependant, les unités de cogénération produisent une chaleur supplémentaire lorsqu'elles augmentent la puissance électrique de sortie, dont la majorité est rejetée dans l'atmosphère, ce qui a entraîné une perte d'efficacité énergétique. Une autre solution consiste à inciter les consommateurs à réduire leur demande pendant les heures de pointe. C'est le plus important, lorsque cette demande tombe dans l'une ou l'autre des catégories :

- ne pas pouvoir être satisfait par des sources d'énergie renouvelables
- ne coïncide pas avec la demande de chaleur produite par le système de cogénération.

Ces incitations devraient être fondées sur le comportement de consommation des utilisateurs, la fourniture d'informations et la sensibilisation et l'éducation pertinentes.

4.4.1 La raison d'être d'une rénovation de chauffage intelligente

La majeure partie de l'attention des options technologiques décrites qui ont été discutées appartient à la catégorie plus large des solutions descendantes. Il est caractéristique de ces options qu'elles soient imposées par une planification centrale au sein de l'organisation et qu'elles soient très courantes dans presque toutes les tentatives de transition énergétique bas carbone. Cela est vrai pour l'UEA et ses systèmes énergétiques localisés, comme c'est le cas pour d'autres exemples de transition, que ce soit dans de petites



communautés ou dans des programmes régionaux ou même nationaux plus vastes. Cependant, alors que la justification de la conception centrale dans la planification nationale peut être justifiée pour des raisons d'économies d'échelle, ce n'est pas nécessairement vrai pour les systèmes communautaires plus petits. Dans de tels systèmes, la connexion entre les systèmes énergétiques et leurs utilisateurs (la communauté) peut être plus grande car 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 n'a pas ou peu d'alternatives. Par conséquent, cela soulève l'argument en faveur de l'innovation qui permet un paradigme différent de l'approche descendante, c'est-à-dire une approche ascendante.

Il est clair que la réorganisation d'un système énergétique ascendant complet sur un campus demande de grands moyens financiers et doit être planifiée de manière appropriée, pour permettre aux installations existantes d'atteindre la fin de leur durée de vie. Il existe cependant une marge d'innovation même si elles n'offrent pas une solution ascendante complète, pour autant qu'elles contribuent à rééquilibrer l'ensemble du système. Sur le campus de l'UEA, les résidences étudiantes proposent un cas d'application intéressant. Une différence majeure par rapport aux autres bâtiments universitaires est que les résidences présentent une occupation plus élevée, puisqu'il s'agit de véritables espaces de vie pour les étudiants. La demande d'énergie la plus importante dans les résidences étudiantes est l'énergie de chauffage. En tant que conception standard, la plupart des bâtiments résidentiels sont exploités de manière centralisée, avec des commandes de chauffage marche/arrêt très basiques pour le début et la fin de la saison de chauffage en automne et au printemps. Il n'y a pas d'ajustement pour les pièces qui ont un chauffage solaire direct important ou pour les pièces qui sont inoccupées pendant de courtes ou plus longues périodes. Il en résulte un manque d'optimisation en termes d'utilisation d'énergie et de confort d'utilisation puisque les utilisateurs n'ont aucun contrôle sur le système.

4.4.2 Caractéristiques du système

Un système modernisé permettrait aux utilisateurs d'interagir avec le système énergétique, en fournissant des informations, en permettant une expansion modulaire, en aidant à réduire les émissions nocives et à améliorer l'efficacité énergétique. A cette occasion, l'objectif est de permettre aux utilisateurs d'énergie (étudiants) d'avoir la maîtrise de leur système de chauffage. Par conséquent, le système de fourniture de chaleur traditionnel est amélioré avec une combinaison de capteurs de température, de fourniture d'informations à l'utilisateur au niveau de la pièce, d'unités de contrôle dans la pièce et au niveau agrégé (figure ci-dessous). Profitant du fait que le déploiement se fait au sein d'une université et que les utilisateurs ciblés sont des étudiants, le système est complété par une formation sur ses caractéristiques, ses avantages pour l'utilisateur et l'université et enfin l'importance des systèmes énergétiques intelligents pour la transition énergétique bas carbone.

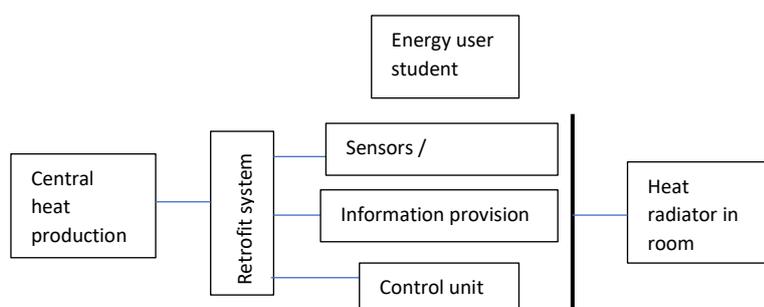


Figure 21 Caractéristiques du système modulaire

Les avantages de cette approche peuvent offrir :

- Réduction de la consommation d'énergie et des émissions réduites nécessaires à la transition énergétique bas carbone
- Meilleure correspondance entre l'offre et la demande d'énergie, réduisant le gaspillage de chaleur de cogénération lors de pics grâce à l'information
- Contrôles individuels et centralisés qui responsabilisent l'utilisateur d'énergie (étudiant), sensibilisant ainsi la nouvelle génération de citoyens à l'énergie à faible émission de carbone
- Confort amélioré, car il y a un contrôle direct des paramètres de confort
- Intégration dans un système de chauffage existant, ce qui est important pour la réplique pour la modernisation d'autres bâtiments qui ont déjà un système de chauffage plus ancien
- Modularité pour une croissance flexible selon les besoins puisqu'il peut y avoir une extension pièce par pièce



4. Résumé

Chaque système énergétique est unique et peut présenter des enjeux très différents selon son contexte propre. La conception de solutions techniques à destination de territoires isolés dépend donc de chaque situation, et repose tout d'abord sur un état des lieux du contexte du territoire et la réalisation d'un diagnostic.

Sur la base de ce diagnostic, les objectifs à courts et moyens termes sont à définir sur les différents axes que sont : Autonomie, Sécurité du système énergétique, Résilience, Pollutions/Nuisance.

La concertation avec la population locale durant la phase de définition des axes retenus est importante, étant donné que les impacts des nouvelles actions se feront directement ressentir par la population.

L'ordre et l'importance des actions entreprises doivent suivre la hiérarchie suivante :

1. Réduction des consommations : réduction immédiate de la dépendance avec les apports extérieurs, en plus de réduire les impacts et nuisances locales (ex. émissions polluantes)
2. Augmentation de la production renouvelable : augmentation de l'indépendance énergétique et de la valorisation locale de l'énergie. Augmentation potentielle de l'impact sur l'environnement local.
3. Ajouter de l'intelligence : adapter la production à la consommation dans la mesure du possible, et ensuite adapter les consommations à la production (qui a potentiellement plus d'impact sur le confort des consommateurs).

Une fois les actions bien identifiées, il faut passer à la phase de concrétisation avec la sélection de solution techniques, permettant d'atteindre les objectifs. La sélection et la classification des solutions techniques se feront en fonction des coûts et des résultats attendus sur la durée de vie de chaque solution technique.

L'implication de la population doit rester importante à ce niveau, afin de présenter les différentes solutions techniques, et leurs implications.

Selon les actions, la population sera plus ou moins impactée soit par son implication dans l'action (ex. objet informatifs), soit par les impacts sur son rythme de vie (ex. réduction ponctuelle de consommation imposée ou choisie).

Pour conclure, comme précisé initialement, chaque territoire isolé est unique et il n'existe pas de méthode prédéfinie. Ce document propose des éléments méthodologiques pour la mise en place d'un « smartgrid » ou réseau intelligent dans le cadre d'un système énergétique isolé, et une adaptation pour chaque territoire est à faire.

