

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2021-2022

Optimisation de l'offre énergétique électrique d'origine 100% renouvelable

Réponse de l'offre à la demande par foisonnement et minimisation du surplus à l'échelle territoriale

Mindjid Maizia

Pierre Bertin

Optimisation de l'offre énergétique électrique d'origine 100% renouvelable

Réponse de l'offre à la demande par foisonnement et minimisation du surplus à l'échelle territoriale

MAIZIA Mindjid

BERTIN Pierre

2021-2022

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements à Mindjid MAIZIA, directeur de recherche de ce projet de fin d'études et enseignant-chercheur au sein de Polytech Tours qui, dans un contexte inédit, a su me guider et me transmettre ses connaissances. Grâce à son écoute son expertise, j'ai pu mener une mission en adéquation avec mes attentes et les attendus de la formation.

Je souhaite adresser mes remerciements au corps professoral et administratif de Polytech Tours Département Aménagement du territoire et Environnement, pour la richesse et la qualité de leur enseignement.

Je tiens également à remercier Chloé VALLON, Victorien FLEURY, Côme GEOFFRAY, camarades de promotion, pour leur aide précieuse dans les moments les plus délicats et qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Enfin, un grand merci à ma mère et mon père, pour leur fierté, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel, à la fois moral et économique, qui m'a permis de réaliser les études que je désirais.

SOMMAIRE

Table des matières

Introduction.....	8
Méthode.....	10
1- Estimation de la demande énergétique.....	10
A-Définition et principes	10
B-Foisonnement et courbes de charge des appels de puissance électrique.....	12
2- Modèle de l'offre énergétique : mix énergétique	13
A-Définition	13
B- Choix et modèle	14
3- Offre / Demande : la solution la plus adaptée.....	15
Etude de cas : Résultats et Discussion	17
1-Demande énergétique d'un quartier théorique.....	17
2-Offre énergétique, un ensemble de solution possible	20
3-Une optimisation de l'offre : une offre adaptée à la demande.....	21
Conclusion	23
Bibliographie	24
Annexes	25

Introduction

Concernant l'Accord de Paris visant à limiter le réchauffement planétaire en dessous de 2°C, des investissements considérables dans les technologies d'énergie renouvelable sont nécessaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les problèmes de plus en plus graves de pression sur l'environnement écologique et de pénurie d'énergie font que les questions d'énergie et d'environnement attirent beaucoup d'attention. Par conséquent, le taux de popularisation des énergies renouvelables dans le réseau de distribution d'électricité est devenu une tendance inévitable (Xin Zhao , 2021).

Aujourd'hui, la tendance de la production d'énergie électrique se traduit par le passage à l'énergie verte, à une énergie provenant d'une source d'énergie renouvelable. Il est alors important de voir si cette transition est réalisable, dans quelles proportions ainsi que de savoir à quelles échelles peut-on mettre en place cette initiative. Bien qu'à l'heure actuelle, plusieurs pays, dont la France, maintiennent encore ces sources de production utilisant des combustibles fossiles et nucléaires, 74% (Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020), surtout pour réguler et équilibrer le système électrique, il n'en est pas moins exact que leurs réserves seront épuisées et qu'à partir de maintenant cette nouvelle ère énergétique approche. Il n'est pas non plus prévu de suspendre immédiatement ces sources polluantes, mais progressivement jusqu'à atteindre 100% d'énergies renouvelables. La figure 1 représente la part de la production renouvelable dans la couverture de la consommation en 2018. On remarque que tous les territoires ne sont pas égaux dans le développement des infrastructures renouvelables.

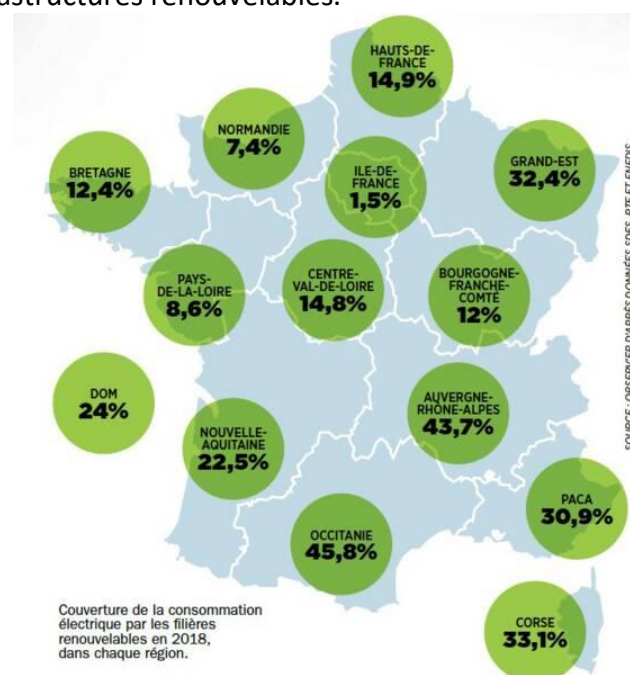


Figure 1 : couverture de la consommation par la production renouvelable (WattValue, 2018)

La figure 1 représente la part de la production renouvelable dans la couverture de la consommation en 2018. On remarque que tous les territoires ne sont pas égaux dans le développement des infrastructures renouvelables.

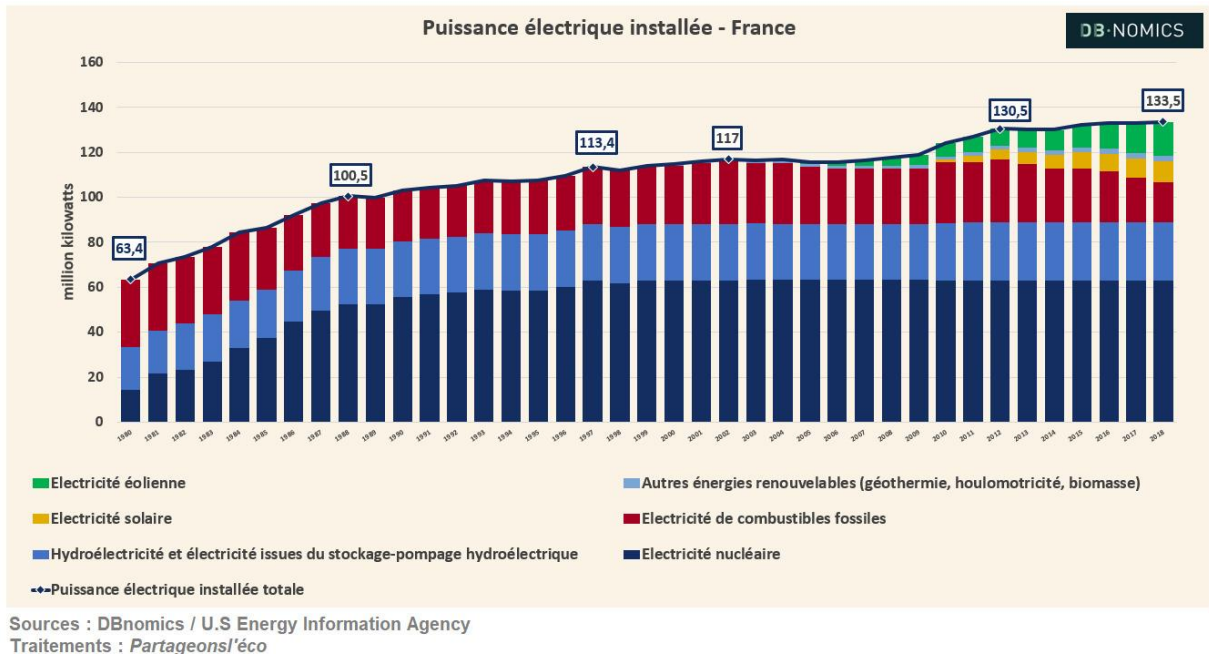


Figure 2 : Puissance électrique installée en France (US Energy Information Agency, 2018)

La figure 2 nous expose la puissance électrique installée en France au fil des années. Malgré une diminution considérable au niveau des combustibles fossiles, on remarque qu'elle ne fait qu'augmenter grâce à l'apport des puissances issues des nouvelles énergies renouvelables. Grâce aux efforts et aux investissements des territoires français, l'évolution de la production électrique en France avance dans un chemin prometteur. Ce positionnement est très intéressant pour l'avenir, cependant afin d'instaurer un système stable et efficace, la connaissance des appels de puissance des différents utilisateurs du réseau est essentielle à une bonne gestion des infrastructures de transport et de distribution d'énergie. En effet, la difficulté pour les gestionnaires de réseau de distribution d'énergie (GRD) est de dimensionner les ouvrages en évitant des surcapacités qui sont sources de surcoût. Si l'agrégation et le foisonnement des charges permettent des économies d'échelle, à des échelles plus réduites il est nécessaire de représenter toute la diversité comportementale et technologique à l'origine des appels de puissance. De plus, le réseau de distribution traditionnelle a été conçu pour un flux d'énergie unidirectionnel de la source (sous-stations primaires HT/MT) aux consommateurs et a été construit pour répondre uniquement aux exigences de la charge du consommateur. Les circonstances ayant considérablement changé au cours des dernières décennies et avec la connexion des producteurs d'électricité, le réseau de distribution autrefois passif se transforme rapidement en réseau actif. Dans la pratique, cela nécessite souvent des coûts d'investissement plus élevés dans le réseau de distribution afin d'assurer la connexion de la production distribuée au système de distribution (Renewable Energy, 2021).

Problématique du projet :

Est-il possible de proposer une offre mix énergétique composée à 100% d'énergie renouvelable à l'échelle territoriale ? Existe-t-il une échelle optimale qui permet le foisonnement de la demande d'énergie électrique à satisfaire ?

Hypothèses :

Il est possible de proposer une offre mix énergétique à 100% renouvelable à l'échelle territoriale et il existe une échelle optimale qui permet le foisonnement de la demande d'énergie électrique à satisfaire

Dans cette perspective, cette étude proposera dans un premier temps la méthode employée accompagnée de quelques définitions, notamment l'explication du concept du foisonnement des courbes de charges électriques ainsi que la définition de l'offre énergétique installée. Dans un second temps, elle se focalisera sur l'application de la méthode sur une étude de cas théorique avant de discuter les résultats.

Méthode

L'objectif de ce PFE est de concevoir un modèle qui calcule une courbe plate égale à 0 qui décrit le solde énergétique entre la production d'énergie électrique renouvelable et la demande à satisfaire issue d'un ensemble de consommateur prédéfini.

La méthode se définit en trois phases :

- Une estimation de la demande énergétique à satisfaire par le principe du foisonnement des courbes de charges ;
- Elaboration d'un modèle de mix énergétique de l'offre en fonction des paramètres des systèmes de production ;
- Choix de l'offre énergétique la plus adaptée à la demande et qui minimise le surplus énergétique entre l'offre et la demande.

1- Estimation de la demande énergétique

A-Définition et principes

La demande énergétique est définie comme l'énergie nécessaire pour satisfaire l'ensemble des besoins d'une population. Dans notre étude, nous nous intéressons aux besoins électriques. Pour introduire la demande énergétique en France aujourd'hui, nous savons que les bâtiments représentent une fraction importante de l'énergie consommée par un pays, jusqu'à 20-40% de la consommation annuelle d'énergie. Si l'on ne considère que l'électricité, cette fraction est encore plus importante, atteignant environ 73 % de la consommation totale d'électricité, répartie à parts égales entre les logements résidentiels et commerciaux (Home energy consumption feedback: A user survey, 2011). Cette demande énergétique est très variable selon le contexte et la population étudiée, afin d'avoir une approximation de celle-ci, on peut utiliser le principe du foisonnement.

D'une part, on peut définir le foisonnement comme le phénomène résultant de la superposition de courbes de charge non-concomitantes pour une échelle de temps donnée. Le vocable qui se rapporte à cette notion est varié : simultanéité, diversité, degré de concomitance ; tous traduisent ce principe d'empilement de courbes aux allures chaotiques (Modelling the load curve of aggregate electricity consumption using principal components, 2005). Nous adoptons donc f le facteur de foisonnement explicité en équation pour n courbes de charge p . Cet indicateur est compris entre 0, lorsque les pointes sont non-concomitantes, et 1, lorsque les pointes sont superposées :

$$f = \frac{\max_{[t_1, t_2]} (\sum_{i=1}^n p_e^i)}{\sum_{i=1}^n \max_{[t_1, t_2]} (p_e^i)}$$

Le foisonnement se calcule alors en superposant différentes courbes de charges (CdC). Le terme "charge" définit la quantité d'énergie électrique fournie ou requise en un ou plusieurs points précis d'un réseau électrique. Les réseaux électriques sont conçus pour maintenir un équilibre dynamique entre la demande d'électricité et la quantité fournie par les générateurs. Les grands consommateurs d'électricité sont facturés à la fois pour la consommation et la demande d'énergie dans leurs factures d'électricité. Alors que le coût de la consommation reflète le nombre total de kWh utilisé, le coût de la demande correspond aux frais généraux de l'électricité pour fournir la demande instantanée agrégée aux consommateurs, en particulier pendant les heures de pointe. Entre autres, le foisonnement permet de moyenniser les profils de demande et ainsi de définir des profils moyens. Grâce à cela le profilage permet d'associer à une typologie de consommateur un profil de charge moyen qui est certes très différent des CdC unitaires mais qui à partir d'un certain niveau d'agrégation devient suffisamment proche de la CdC agrégée. On tente donc de quantifier les estimations et de préciser la notion de : suffisamment proche. Retenons que le foisonnement dépend en partie de la fréquence des appels de puissance (Cyril Vuillecard, 2013).

Pour illustrer le propos étudions la figure 3. Elle nous décrit la puissance électrique nécessaire en fonction de la demande sur une journée. Pour comprendre l'intérêt d'un foisonnement moyennant les profils de demande, il faut confronter les courbes représentant la puissance centralisée (tiret rouge) et la puissance décentralisée (tiret noir). La puissance centralisée est la courbe de charge agrégée, somme des 4 CdC alors que la puissance décentralisée est le niveau atteint par la somme des pointes individuelles. L'économie de puissance maximale de production entre solution centralisée et solution de production individuelle est définie par l'écart entre les deux courbes.

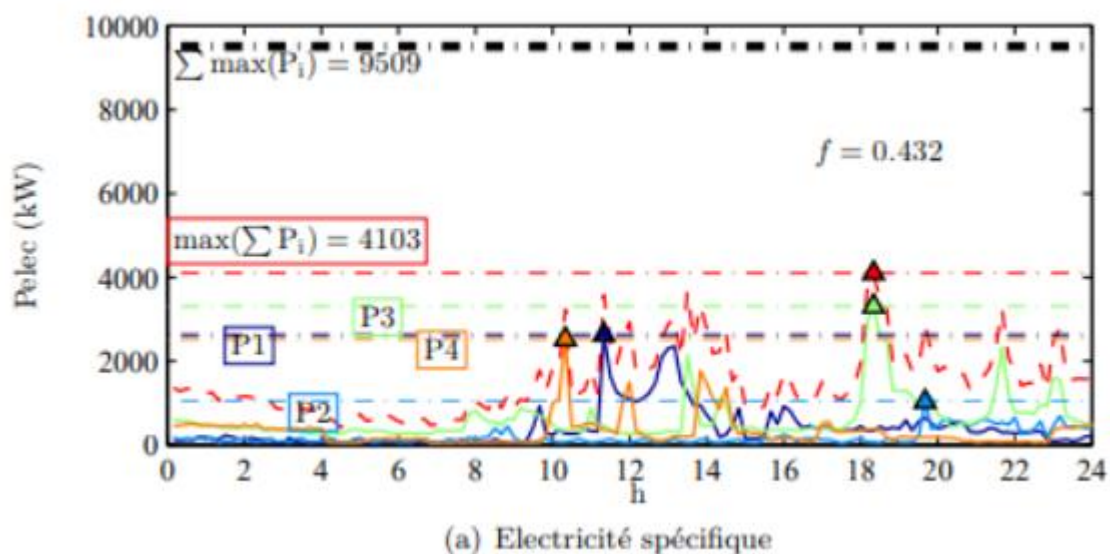


Figure 3 : Illustration du foisonnement de 4 CdC (Cyril Vuillecard, 2013)

B-Foisonnement et courbes de charge des appels de puissance électrique

Dans le cadre de l'étude, nous voulons obtenir la courbe représentant la demande énergétique totale d'une certaine population. Pour l'obtenir, il est possible de passer par le principe de foisonnement des courbes de charges qui sont les résultantes des appels de puissance des besoins électriques.

La population concernée est divisée en trois secteurs : des logements résidentiels, du tertiaire ainsi que des industries. Pour chaque secteur, le foisonnement des courbes de charge des consommations individuelles de chaque élément nous permettra d'obtenir l'allure de la demande d'électricité sans les effets induits par le caractère volatil des comportements individuels. Par exemple pour le secteur du logement, la consommation peut différer d'un logement à l'autre, en effet, le temps de présence, les activités liées à la diversité des comportements individuels expliquent ce phénomène. Le foisonnement permettra d'avoir l'allure de la consommation sans les effets volatils.

Dans un premier temps, pour créer ces courbes, il faut déterminer les usages spécifiques associés à chaque secteur. Ces usages tiennent compte de la durée d'utilisation, de la puissance appelée et de l'incertitude liée aux horaires de début et de fin d'utilisation de chaque appareil électrique (téléviseur, ordinateur, frigo...) (Annexe 1). Dans un deuxième temps il faut choisir le nombre d'éléments, soit le nombre de courbes chaotiques foisonnées. Ici, le nombre d'éléments est défini comme le nombre de logements, d'industries ou encore de bureaux (tertiaire).

Une fois les usages spécifiques détaillés et le nombre d'éléments associés (nombre de bâtiments) à chaque secteur, on obtient une courbe foisonnée pour les trois secteurs (Annexe 2).

La courbe de la demande énergétique totale passe par l'interpolation et l'agrégation (Annexe 3) de ces trois courbes. La figure 4 représente l'allure de la courbe de la demande énergétique.

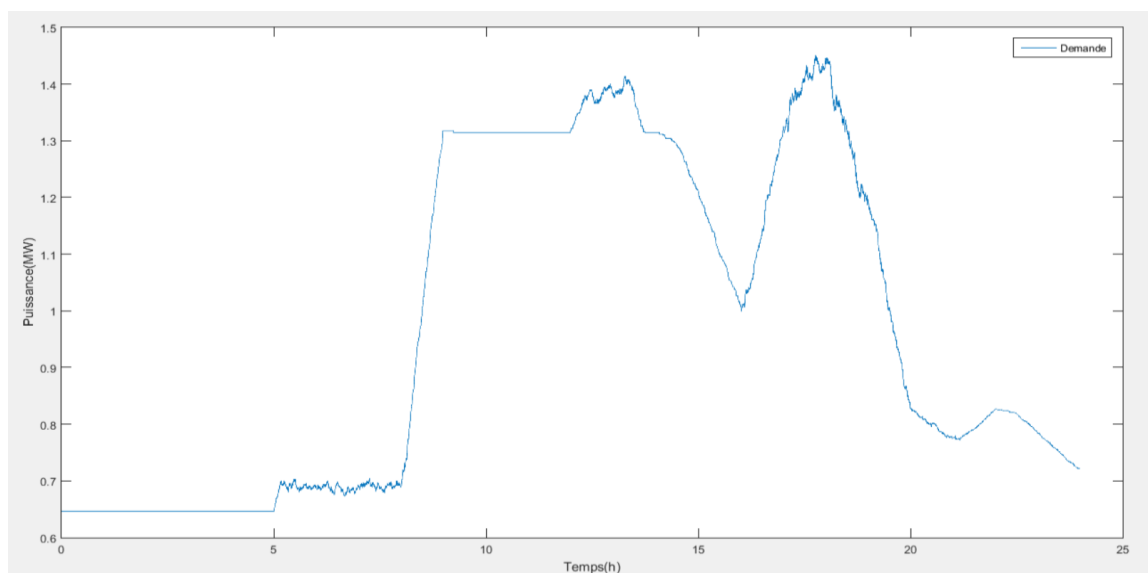


Figure 4 : Allure de la demande énergétique totale d'un ensemble

Afin d'avoir un certain référentiel dans l'allure de la courbe totale de la demande énergétique, d'une part, les tableaux des usages spécifiques reprennent quelques valeurs issues d'un article (Home

energy consumption feedback: A user survey, 2011) et d'autre part, l'allure de la courbe devrait suivre celle de la consommation électrique nationale issue de la RTE (Annexe 4) ou encore celle-ci réalisé par Laurent Mineau, responsable des Marchés Romande Energie, représentant la consommation journalière d'un logement (Annexe 5).

2- Modèle de l'offre énergétique : mix énergétique

A-Définition

L'étude portera sur une offre énergétique composée uniquement d'énergies renouvelables (ENR). Sont classées dans la catégorie des énergies renouvelables, toutes les énergies que la nature constitue ou reconstitue plus rapidement que l'Homme ne les utilise. Elles peuvent ainsi être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain (FuturaScience).

En partant de cette définition, les énergies qui sont considérées comme « renouvelables » sont :

- l'énergie hydraulique, énergie fournie par le mouvement de l'eau
- l'énergie éolienne, énergie du vent transformé au moyen d'un dispositif aérogénérateur
- l'énergie solaire, fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil
- la biomasse, énergie issue de matière organique d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique
- la géothermie, énergie de la Terre qui est convertie en chaleur

Depuis 2000, les installations électriques renouvelables connaissent un essor important, abstraction faite de la filière hydroélectrique, déjà bien équipée auparavant. La France, par sa taille et son climat, a le potentiel pour être un pays moteur dans le développement des énergies en Europe. En effet, malgré une faible hausse chaque année de 8% du parc hydro-électrique, les capacités de production électrique éolienne et solaire bondissent, leur puissance électrique installée ne fait qu'accroître sur le territoire. Cependant avoir une consommation électrique d'origine 100% renouvelable nécessite préalablement des études et des infrastructures conséquentes suivant le territoire étudié. La figure 5 expose une méthode utilisée par des chercheurs afin de déterminer le potentiel technique des énergies renouvelables sur une zone déterminée, ici, la zone choisie est l'ASEAN (Association des nations de l'Asie du Sud-Est) (Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020).

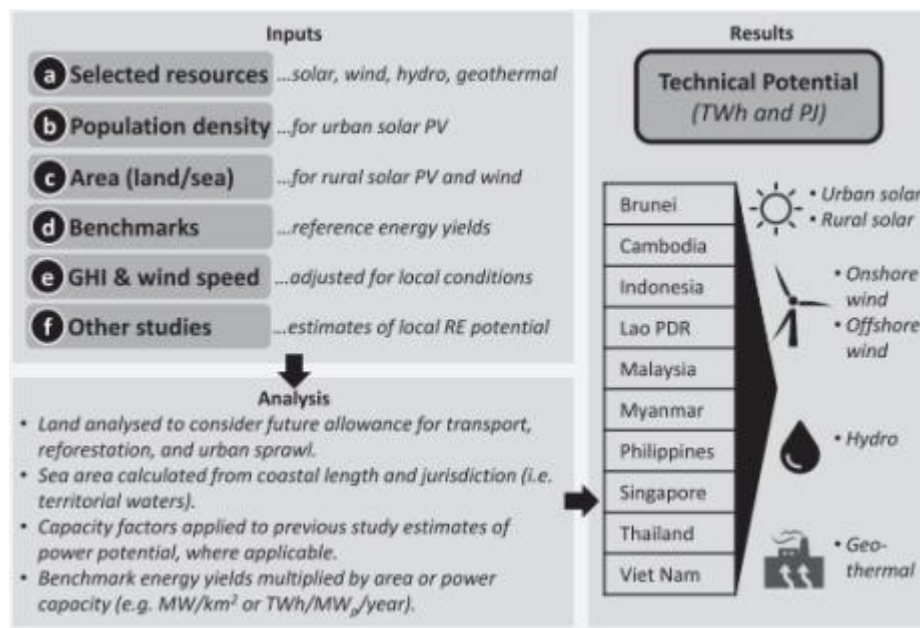


Figure 5 : Méthode d'analyse pour le potentiel technique des énergies renouvelables (Sustainable Energy Technologies and Assessments,2020)

Dans un premier temps, ils ont cherché à mettre en évidence les écarts entre le mix énergétique actuel de l'ASEAN et la réalisation de 100% d'énergie renouvelable dans l'approvisionnement énergétique total, afin de révéler l'étendue du changement potentiel. Cette première étape est applicable à toutes les zones potentiellement soumises à ces changements d'organisation énergétique. Ensuite, ils ont cherché à déterminer le potentiel technique d'une sélection de source d'énergies renouvelables dans la région afin de quantifier l'étendue des possibilités d'amélioration de l'adoption des énergies renouvelables (ER) et les voies potentielles pour atteindre 100%.

B- Choix et modèle

Dans l'étude, le choix s'est porté sur deux énergies renouvelables. Les énergies sélectionnées pour répondre à la demande énergétique de la population sont l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Ces énergies sont déjà intégrées à l'environnement et aux paysages et ne sont plus des sources inconnues, de plus, elles sont déjà bien développées dans la majorité des territoires ainsi que leur secteur de production et de dépannage.

Afin d'obtenir la courbe de charge de l'offre énergétique produite par ces deux ENR, le modèle ou la fonction offre (Annexe 6) prend en compte trois variables exogènes (trois antécédents) :

- Le nombre d'éolienne « n »
- Le diamètre du rotor « D » en m
- La surface de panneaux photovoltaïque « S » en m²

En ce qui concerne les autres variables exogènes du modèle, elles seront considérées comme des constantes. Entre autres la vitesse du vent à la normale de la pâle (Annexe 7) ou encore le rayonnement solaire direct (Annexe 8) sur les panneaux où leurs valeurs ont été prise pour une journée type en été.

Cette fonction calculera, dans un premier temps, la puissance délivrée sur une journée par l'énergie éolienne pour un nombre d'éolienne et un diamètre du rotor. La formule utilisée afin de calculer la puissance éolienne est la suivante :

$$Oe = n * \omega t^3 * D^2 * \rho e * 0,37 * \pi^4$$

Avec :

- Oe = offre éolienne (W)
- n = nombre d'éolienne
- ωt = vitesse du vent à la normale (m/s)
- D = diamètre du rotor (m)
- ρe = rendement (égal à 0,2)

Puis elle fera la même procédure pour l'énergie solaire pour une surface de panneaux donnée. La formule est la suivante :

$$Os = S * \rho s * \gamma$$

Avec :

- Os = offre solaire (W)
- S = surface panneaux solaire (m²)
- ρs = rendement (égal à 0,2)
- γ = rayonnement solaire (W/m²)

Enfin la fonction appliquera une interpolation et une agrégation des deux courbes obtenues pour obtenir l'offre énergétique totale sur une journée. Une interpolation entre deux ou plusieurs courbes est une fonction qui permet d'avoir un unique vecteur temps ainsi que des valeurs approchées pour chacune des courbes. Celle-ci permet l'agrégation des valeurs d'instant en instant.

3- Offre / Demande : la solution la plus adaptée

La réponse à la demande (DR) guide les utilisateurs pour qu'ils modifient activement leur comportement en matière de consommation d'électricité et change l'idée que l'approvisionnement en électricité accepte passivement les changements de charge des utilisateurs. La planification du réseau de distribution qui prend en compte la réponse à la demande peut également compenser l'impact des facteurs naturels tels que l'intermittence et l'incertitude de la production d'énergie renouvelable distribuée sur le système et maximiser les avantages économiques de l'énergie renouvelable distribuée pour le système. Sur cette base, on peut voir que l'énergie renouvelable distribuée et les charges de réponse à la demande, en tant que ressources importantes pour les réseaux de distribution incrémentaux, peuvent être optimisées en termes de modèles de consommation d'électricité et d'amélioration du fonctionnement économique du réseau si le mécanisme de DR peut être incorporé dans la planification du réseau et faire l'allocation et la gestion en collaboration (Xin Zhao, 2021).

Dans l'étude, la planification du réseau n'est pas prise en compte dans le mécanisme de DR. Une offre énergétique est dite « adaptée » lorsqu'elle répond à tout instant de la journée à la demande

énergétique de la population. L'objectif est de trouver l'offre la plus adaptée à la demande, c'est-à-dire, trouver la combinaison entre l'énergie solaire et l'énergie éolienne de telle sorte à répondre à tout instant à la demande tout en minimisant le surplus énergétique.

Afin de trouver l'offre la plus adaptée à la demande, un modèle d'une fonction objective a été mis au point (Annexe 9). Ce modèle va dans un premier temps appliquer une itération i fois. Cette itération fait appel à la fonction offre vue précédemment, elle permet donc d'obtenir i offres possibles avec une surface de panneaux solaires (S), un nombre d'éoliennes (n) et un diamètre du rotor (D). Sur chaque itération de l'offre i , les variables S , D , n sont choisis aléatoirement parmi leur domaine de définition.

Parmi l'ensemble des solutions d'offres obtenues, il faut appliquer trois conditions pour obtenir la meilleure offre :

$$- \sum_{t=2}^{end} (O(t) * diff(tO)) - \sum_2^{end} (D(t) * diff(tD)) > 0$$

Avec :

O = offre (W)

D = demande (W)

tO et tD les vecteurs d'instant particuliers de O et D

On sélectionne l'offre si l'intégrale de la courbe de l'offre est supérieure à celle de la demande.

$$- Ot(t) > Dt(t)$$

Avec :

O_t = offre aux instants t

D_t = demande aux instants t

t = vecteurs d'instant égal à $tO+tD$

On sélectionne l'offre si elle est supérieure à la demande à tous instants t .

$$- [Min, indiceMin] = \min(O_t)$$

Avec :

Min = l'offre minimale avec S , D , n

$indiceMin$ = indice d'emplacement de l'offre minimum dans la matrice de l'ensemble des offres

On obtient finalement une optimisation de l'offre qui semble la plus adaptée parmi un nombre i d'offres possibles. L'optimisation de l'offre est définie par une minimisation de l'offre en énergie (Wh) tout en minimisant le surplus énergétique entre l'offre et la demande.

Etude de cas : Résultats et Discussion

1-Demande énergétique d'un quartier théorique

La zone d'étude est un quartier sur un territoire théorique. Ainsi, la demande énergétique pour cette étude de cas est définie par la consommation du quartier constitué ici de 300 logements, de 200 bureaux ainsi que de 3 industries.

Pour chaque secteur, grâce aux usages spécifiques définis précédemment et aux foisonnements des courbes de charge individuelles chaotiques, on obtient la demande énergétique sous forme de courbe de charge.

Ainsi pour le secteur du logement résidentiel, on obtient la courbe suivante en figure 6 :

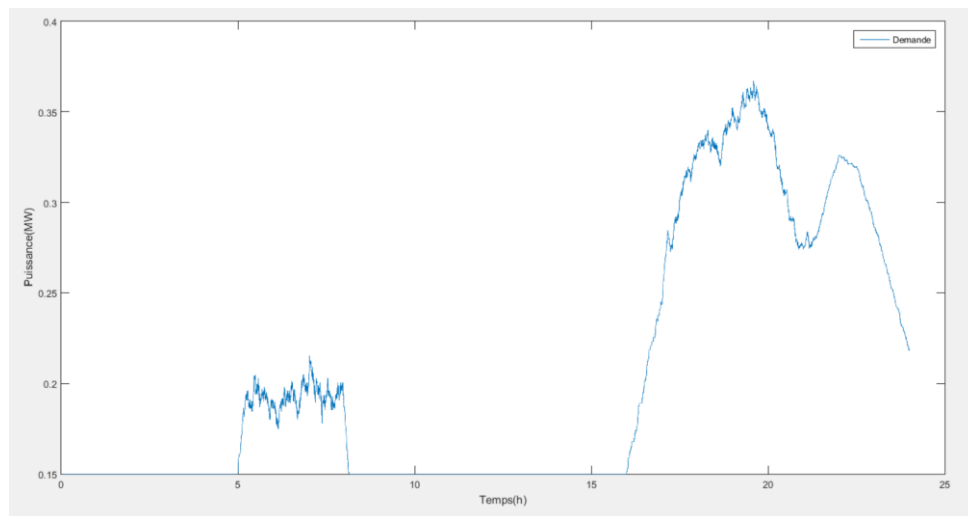


Figure 6 : Courbe de charge foisonnée de la demande énergétique du secteur du logement

Les principales consommations sont présentes essentiellement le matin entre 5h et 10h et en fin de journée entre 16h et 24h. Cette allure correspond à la réalité car on consomme moins d'électricité lorsque l'on dort ou lorsque l'on est au travail.

Concernant le secteur du tertiaire, c'est-à-dire les bureaux, et le secteur de l'industrie, on obtient les courbes de charge suivante en figure 7 et 8 :

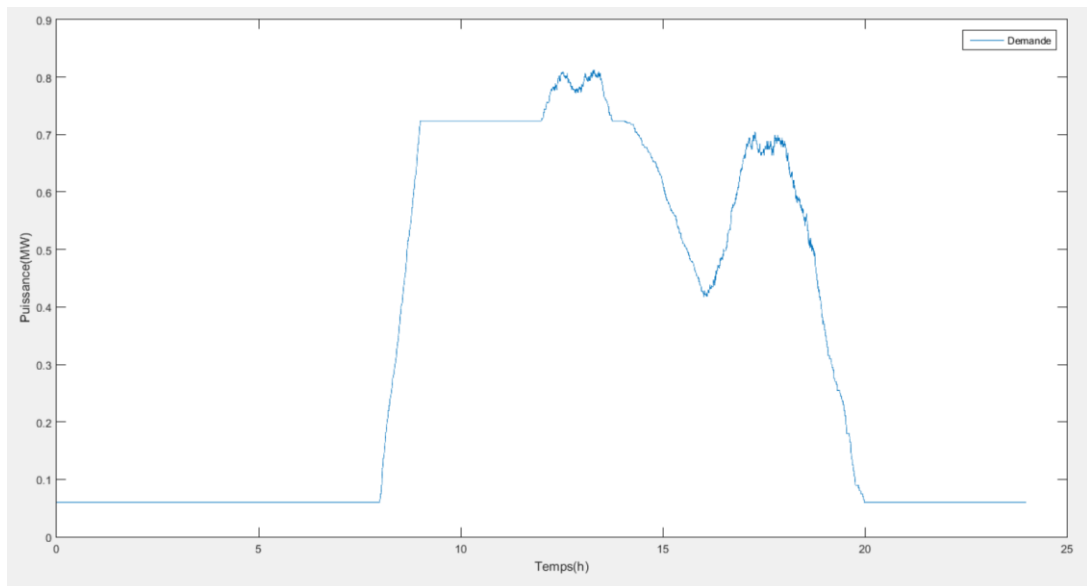


Figure 7 : Courbe de charge foisonnée de la demande énergétique du secteur du tertiaire

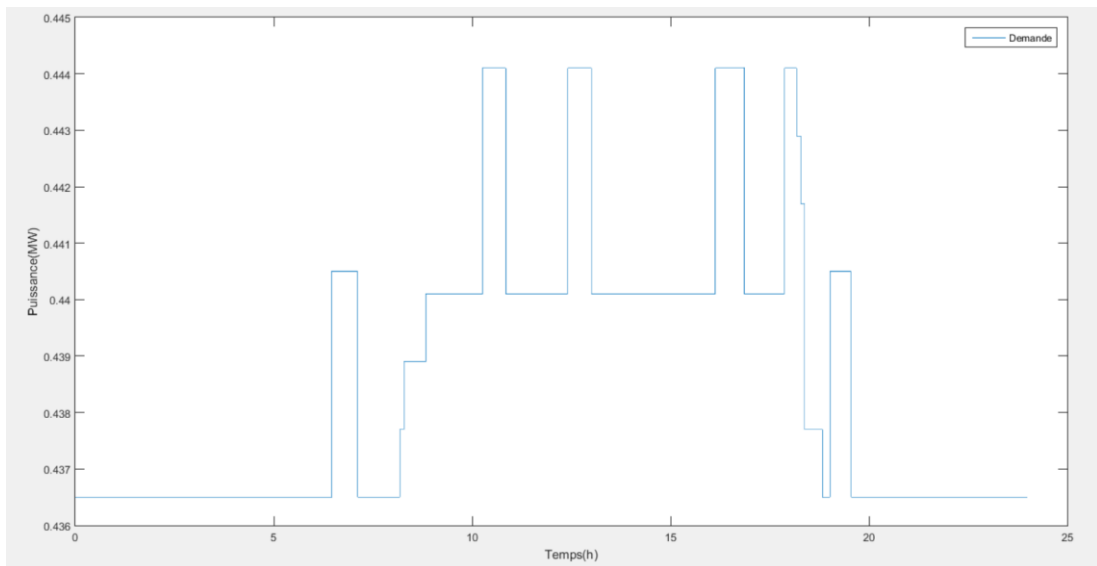


Figure 8 : Courbe de charge foisonnée de la demande énergétique du secteur de l'industrie

Pour le secteur tertiaire et industriel, on remarque que leurs principales consommations se font en journée, ce qui correspond aux horaires de travail de la population active de la zone d'étude.

La demande totale de ce quartier est l'interpolation et l'agrégation de ces trois courbes de charge. Cependant cette demande énergétique totale peut suivre deux scénarios particuliers :

Scénario 1 :

Dans ce premier scénario, la demande énergétique (figure 9) est égale à l'agrégation des trois courbes de charge foisonnées des secteurs. L'énergie totale de la demande sur la journée est égale à **23,4MWh**.

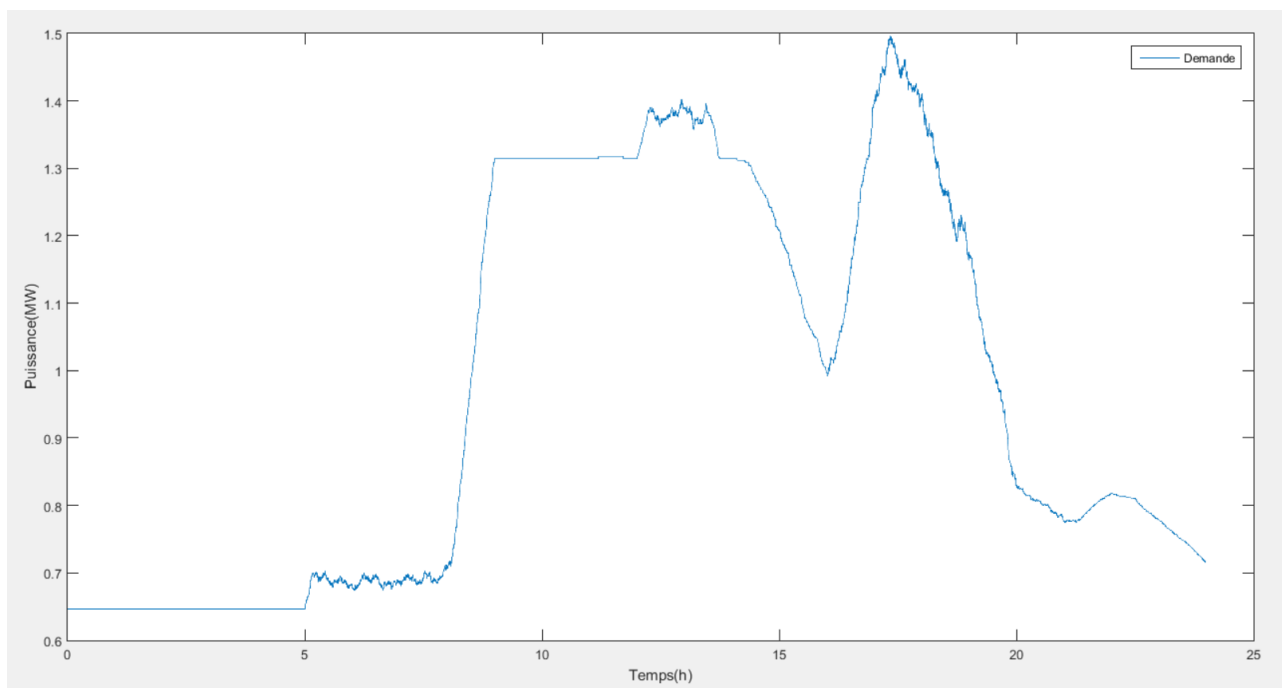
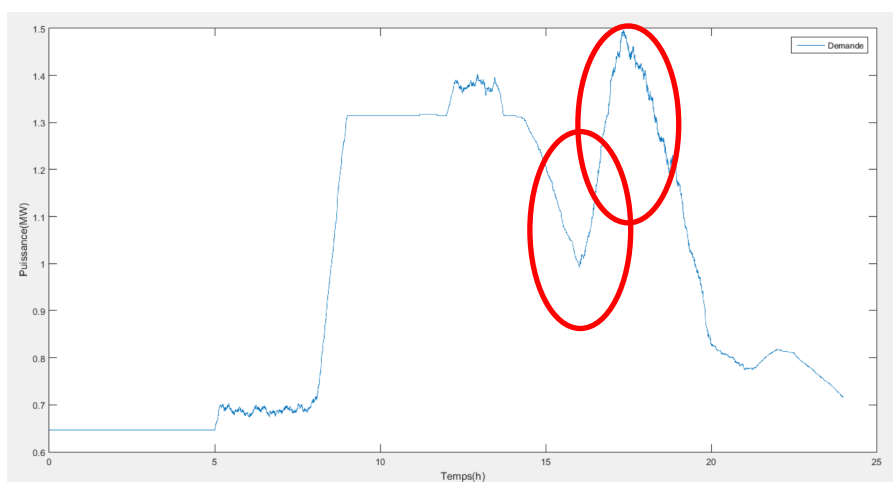


Figure 9 : Courbe de charge foisonnée de la demande énergétique totale du quartier

Scénario 2 :

Dans ce second scénario, l'allure de la courbe de charge de la demande changera de telle manière à optimiser l'offre énergétique par la suite (figure 10). Le fait d'avoir une offre solaire dans notre mix énergétique permet d'avoir une normale centrée sur midi pour la courbe de l'offre. Cet effet implique que la courbe de la demande doit éviter les creux en milieu de journée et les pics en début et fin de journée.



Il faut savoir que ces dernières années, les économies d'énergie et les modes de vie durables ont fait l'objet d'une attention croissante sous l'effet de nombreux facteurs, notamment la situation politique, la stagnation économique, les modes de vie et les philosophies plus écologiques. De manière contre-intuitive, la conservation de l'énergie, dans les pays développés, est actuellement

plus liée aux maisons résidentielles qu'à l'industrie et à la production commerciale. La sensibilisation des ménages, en particulier, présente un potentiel d'économie d'environ 5 à 15 %, ce qui signifie qu'en modifiant légèrement leurs comportements quotidiens, les utilisateurs domestiques peuvent économiser jusqu'à 15 % de leurs besoins énergétiques actuels (Home energy consumption feedback: A user survey, 2011). On obtient alors, en modifiant les horaires d'utilisation des usages spécifiques des logements une nouvelle courbe normalement plus adaptée à l'offre. L'énergie demandée sur la journée est égale à l'énergie de la demande du scénario 1, 23,4 MWh mais l'allure est différente.

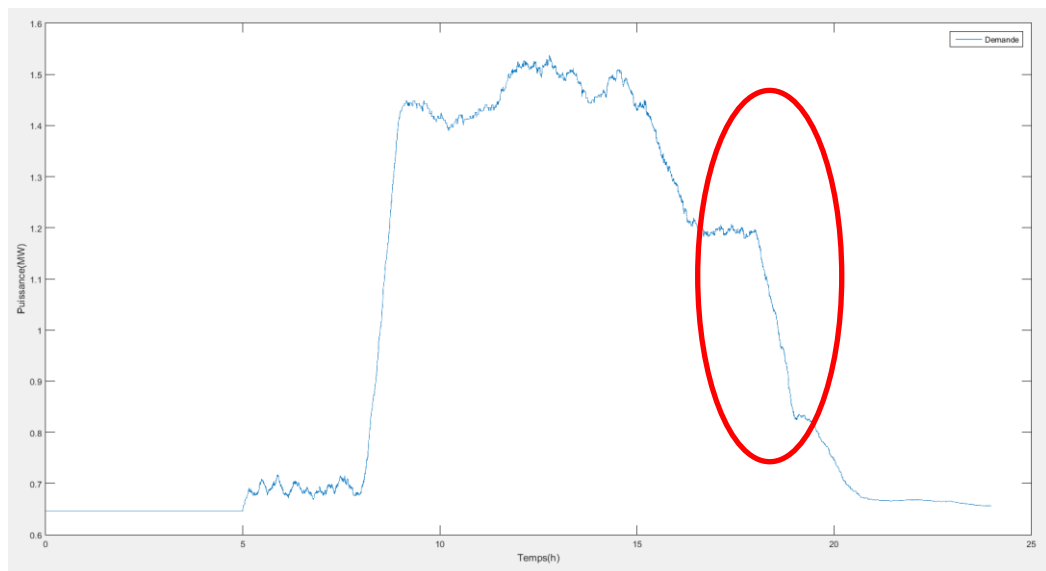


Figure 10 : Courbe de charge foisonnée de la demande énergétique totale du quartier avec effacement diffus

Cette méthode est appelée faire de l'effacement diffus. L'objectif est de lisser la courbe de charge en évitant les pics de puissance. En effet ces pics nécessitent une organisation extrêmement complexe et coûteuse pour le fournisseur d'énergétique qui doit être capable d'acheminer la puissance maximale demandée. En diminuant ces pics de puissance et en centrant la demande sur la courbe de l'offre, les résultats seront meilleurs

2-Offre énergétique, un ensemble de solution possible

Pour rappel, l'offre énergétique dans cette étude est exclusivement constituée d'un système de production d'électricité solaire ainsi qu'éolien. Cette offre doit répondre à la demande à tout instant de la journée. Il ne sera pas question de gestion de stockage dans l'étude.

Pour les deux différents scénarios de demande énergétique, on trouve un nombre important d'offres possibles pouvant répondre à la demande à tout instant (figure 11). Concernant les domaines de définition de la surface de panneaux solaires, du nombre d'éoliennes et du diamètre du rotor, on a :

- $S \in \{500 ; 10\,000\} \text{ (m}^2\text{)}$
- $n \in \{1 ; 10\}$
- $D \in \{15; 60\} \text{ (m)}$

Les domaines de définitions ont été déterminé par les valeurs moyennes de chaque variable que l'on trouve aujourd'hui en France.

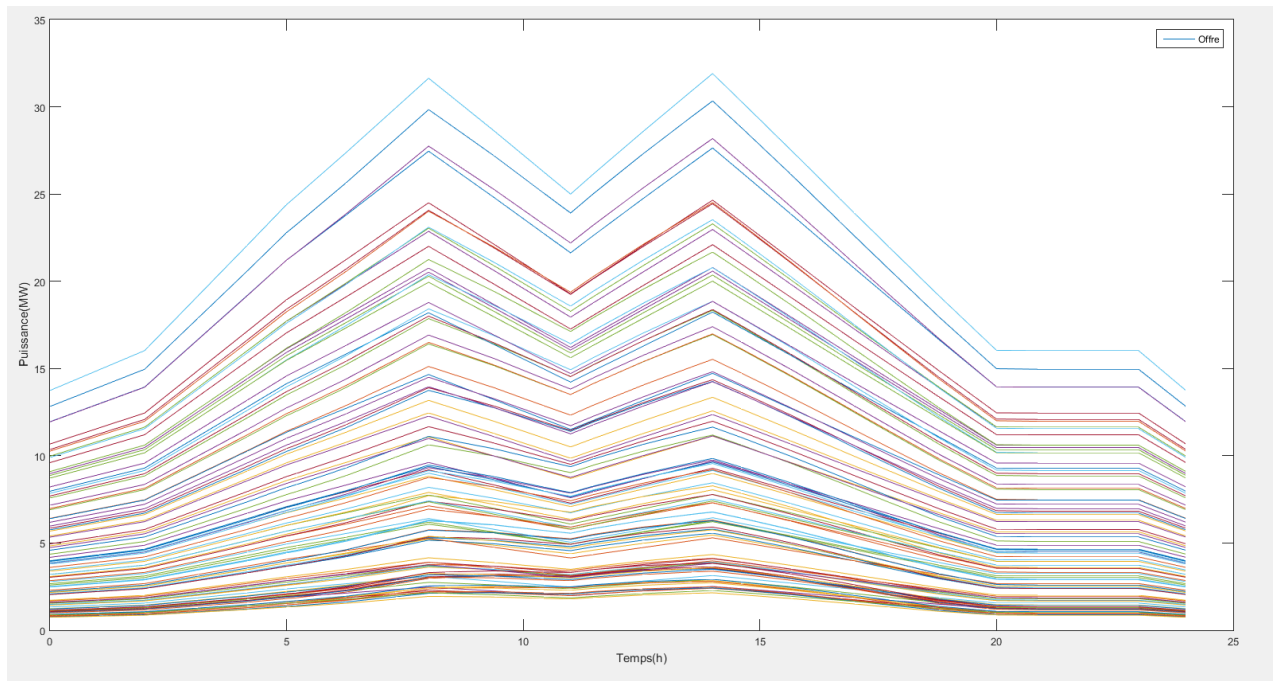


Figure 11 : Courbes de charge des offres possibles

On obtient un tableur (Annexe 10) qui récence l'ensemble des offres possibles avec pour chaque offre, l'intégrale de la courbe, soit l'énergie totale délivrée sur la journée, la surface de panneaux solaires, le nombre d'éoliennes ainsi que le diamètre du rotor.

Cependant pour la majorité de ces offres, les systèmes de production sont surdimensionnés et le surplus énergétique est très important par rapport à la demande. L'objectif est alors de trouver l'offre la plus adaptée pour nos deux scénarios de demande.

3- Une optimisation de l'offre : une offre adaptée à la demande

L'optimisation de l'offre permet une minimisation de l'offre (les systèmes de production) tout en minimisant le surplus énergétique entre l'offre et la demande. La fonction objective permettra de trouver une offre optimisée pour les deux scénarios de demande précédent.

Tout d'abord, on répond à la demande du premier scénario, une demande brute de la consommation du quartier qui n'a pas été modifiée par l'effacement diffus. Après le lancement de la fonction objective, on obtient le résultat suivant :

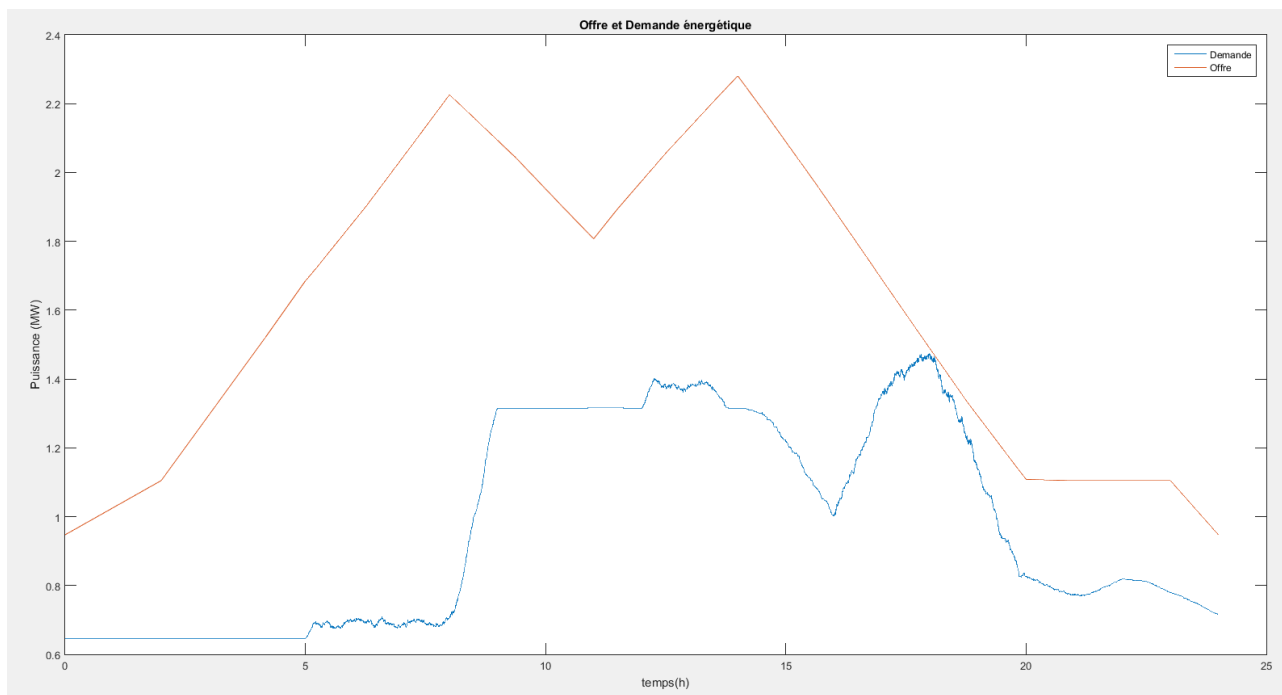


Figure 12 : Courbe de charge de l'offre adaptée à la demande énergétique du scénario 1

L'offre optimisée est élevée à 38,8 MWh pour une demande de 23,4 MWh, soit un surplus de 15,4 MWh, pour 6 éoliennes avec un rotor de 20m et 1000m² de panneaux photovoltaïques.

Maintenant, on s'intéresse au deuxième scénario où la demande a normalement été modifiée par l'effacement diffus afin d'obtenir de meilleurs résultats dans l'optimisation de l'offre. L'image de la fonction objective est telle :

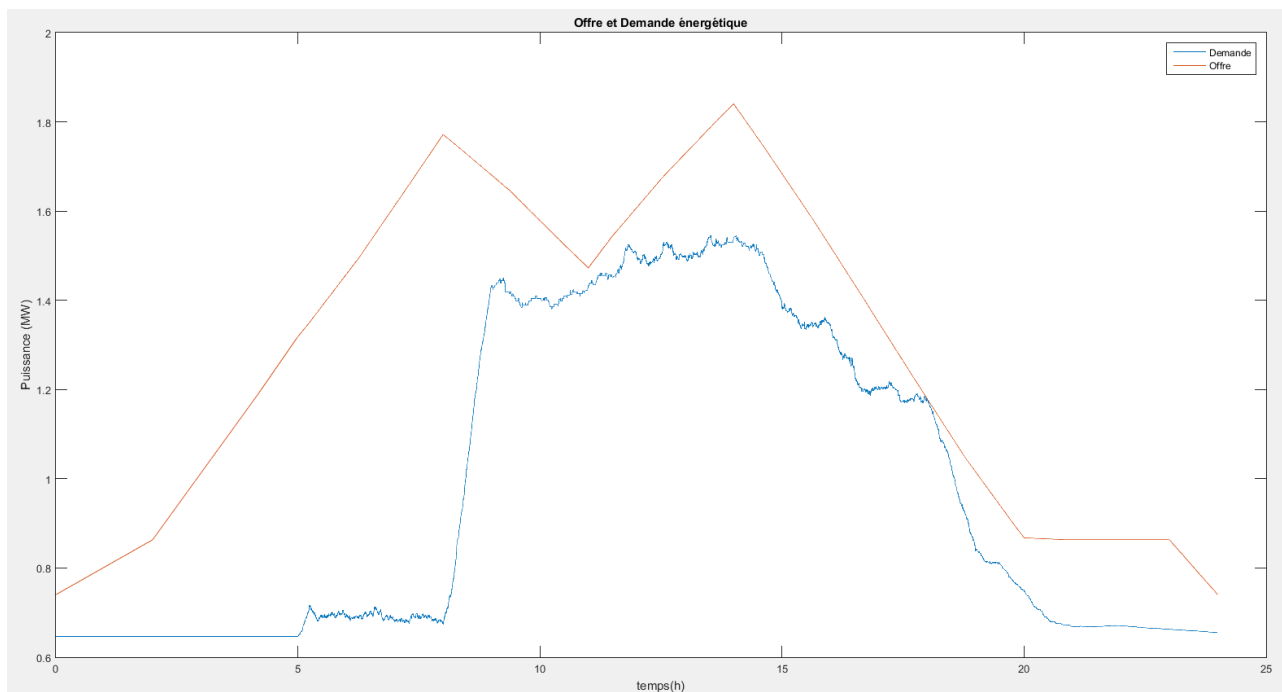


Figure 13 : Courbe de charge de l'offre adaptée à la demande énergétique du scénario 1

Ici, l'offre optimisée est de 30,8 MWh pour une demande de 23,4 MWh, soit un surplus de 7,4 MWh, pour 3 éoliennes avec un rotor de 25m et 1200 m² de panneaux photovoltaïques.

Le résultat des deux scénarios est sans appel. L'effacement diffus sur la demande énergétique permet des économies très importantes à l'échelle du quartier. En effet, on remarque une diminution du surplus énergétique par deux ainsi qu'un potentiel d'économie de l'offre de 22% grâce à l'effacement diffus.

Conclusion

Pour conclure ce projet, on estime qu'il n'existe pas d'échelle « adaptée » qui permet le foisonnement de la demande mais on a pu remarquer à travers l'étude que lorsque l'on se place à l'échelle du quartier ou de la ville, le foisonnement permet d'avoir une image de la demande énergétique totale à satisfaire réaliste et conforme aux consommations individuelles.

De plus, le principe du foisonnement des charges individuelles ainsi que la mutualisation des demandes des différents secteurs sur un quartier a permis d'obtenir une demande énergétique plus stable en supprimant les pics de consommations importantes pour chaque secteur. En effet, cette mutualisation des demandes fond les pics énergétiques individuels des secteurs dans la demande totale de l'ensemble. La consommation énergétique globale du quartier est alors minimale pour un réseau totalement centralisé.

Afin de répondre à cette demande, une offre énergétique composée à 100% d'énergie renouvelable est toujours possible à l'échelle du quartier. De plus, la demande peut être encore modifiée pour minimiser le surplus entre l'offre et la demande en appliquant de l'effacement diffus sur certains usages spécifiques. Cet effacement permet de diminuer l'offre énergétique de 22% ainsi que le surplus de moitié.

Pour proposer des solutions qui pourraient faire l'objet d'une recherche future, il est pertinent de définir quelques limites aux modèles utilisés. Il est également important de jauger dans quelle mesure les incertitudes ou les simplifications du modèle apportent un bémol à ses enseignements. La première limite est l'abstraction du caractère volatil des énergies fatales sur plusieurs jours qui peut changer l'offre énergétique d'un jour à l'autre. En effet, dans le modèle, les valeurs de vitesse de vent à la normale de la pâle et de rayonnement solaire direct sur les panneaux solaires ont été pris sur une journée estivale. On peut alors estimer que pour une journée hivernale, les besoins seront différents, les variables prises constantes aussi et l'offre inadaptée.

La deuxième limite se porte sur le choix des infrastructures de production d'énergie. L'abstraction de l'investissement et du retour sur investissement permet au modèle de proposer des combinaisons entre la surface de panneaux solaires, le nombre d'éoliennes et le diamètre du rotor très diversifié d'un résultat à l'autre pour une même énergie. Cette question de prix pourra stabiliser les résultats et proposer des offres plus réalistes.

Bibliographie

- Ashley Vidinopoulos, Jonathan Whale, Ursula Fuentes Hutfilter : Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020
- Dario Bonino, Fulvio Corno, Luigi De Russis : Home energy consumption feedback: A user survey, 2011
- Xin Zhao, Research on bi-level cooperative robust planning of distributed renewable energy in distribution networks considering demand response and uncertainty, 2021
- Daniel Icaza, David Borge-Diez, Santiago Pulla Galindo : Renewable Energy, 2021
- Cyril Vuillecard : Méthode de construction d'une offre d'effacement électrique basée sur les technologies gaz naturel : Application - micro-cogénération et chaudière hybride, 2013
- <https://www.futura-sciences.com/>
- Thomas Nikolakakis, Vasilis Fthenakis : Energy Policy, 2011
- Rene Prenc, Davor Škrlec, Vitomir Komen : Electrical Power and Energy Systems, 2013
- Kati Koponen, Elisabeth Le Net : Applied Energy, 2021

Annexes

Annexe 1 : Tableaux des usages spécifiques de chaque secteur comprenant la puissance déclenchée à un instant donné et appelée pendant une certaine durée

		Puissance appelée [W]	Horaires de ... à ... [h]		Durée [h]	
Usages spécifiques pour le secteur du logement	Frigo	500	0	0	24	24
	Lave-linge	310	16.5	22	3	3
	Lave-vaisselle	350	20	22	2.5	2.5
	Four	1500	16	250	0.75	1.5
	Micro-onde	900	5	8	0.16	0.16
	Ordinateur	120	17	22	1	2
	Téléviseur	100	21	24	2	3
	Aspirateur	300	17	19	0.16	0.25
	Sèche-cheveux	1750	5	8	0.16	0.16

		Puissance appelée [W]	Horaires de ... à ... [h]		Durée [h]	
Usages spécifiques pour le secteur du tertiaire (1 bureau= 10 ordinateurs)	Éclairage	120	8	9	10	10
	Bureautique (10 ordinateurs)	1200	8	9	10	10
	Ventilation (100W/m²)	5000	16	19	1	1
	Frigo	300	0	0	24	24
	Four/micro-onde	2000	12	13.5	0.25	0.25
	Divers	2000	8	9	6	8

		Puissance appelée [W]	Horaires de ... à ... [h]		Durée [h]	
Usages spécifiques pour le secteur de l'industrie	Éclairage	24000	0	0	24	24
	Bureautique (10 ordinateurs)	1200	8	9	10	10
	Ventilation (100W/m²)	20000	0	0	24	24
	Frigo	1500	0	0	24	24
	Four/micro-onde	4000	5	12.5	0.5	0.75
	Four/micro-onde	4000	13	20.5	0.5	0.75
	Divers	4000	13	20.5	0.5	0.75

Annexe 2 : Code du foisonnement

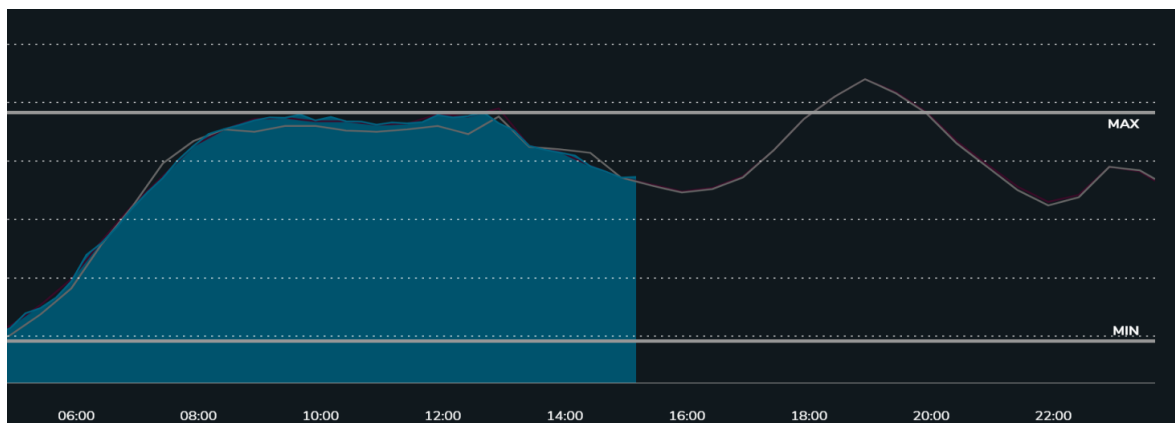
```
function [C_t,t]= foisonnement (U,n)
%foisonnement calcul la courbe de charge foisonnée
%U = usages
%n = nombre de batiment
P_u=repmat(U(:,1),n,1);
h_u=repmat(U(:,[2 3]),n,1);
dr_u=repmat(U(:,[4 5]),n,1);
H_u=sum(h_u,2)/2;
Delta_H_u=abs(diff(h_u,1,2))/2;
D_u=sum(dr_u,2)/2;
Delta_D_u=abs(diff(dr_u,1,2))/2;
delta_H_u=(1-2*rand(size(Delta_H_u))).*Delta_H_u;
delta_D_u=(1-2*rand(size(Delta_D_u))).*Delta_D_u;
d_u=H_u+delta_H_u ;
f_u=D_u+d_u+delta_D_u ;
dt=1/3600/10;
t_P_u=[
    0
    d_u-dt
    d_u
    f_u
    f_u+dt
    24
];
t_P_u(t_P_u<0)=0;
t_P_u(t_P_u>24)=24;
t_s=unique(t_P_u) ;
P_u_t=zeros(numel(P_u),numel(t_s));
for i=1:numel(P_u)
    id=t_s>=d_u(i)&t_s<=f_u(i);
    P_u_t(i,id)=P_u(i);
end
C_t=sum(P_u_t) ;
t=t_s' ;
end
```

Annexe 3 : Code d'estimation de la demande énergétique, interpolation et agrégation

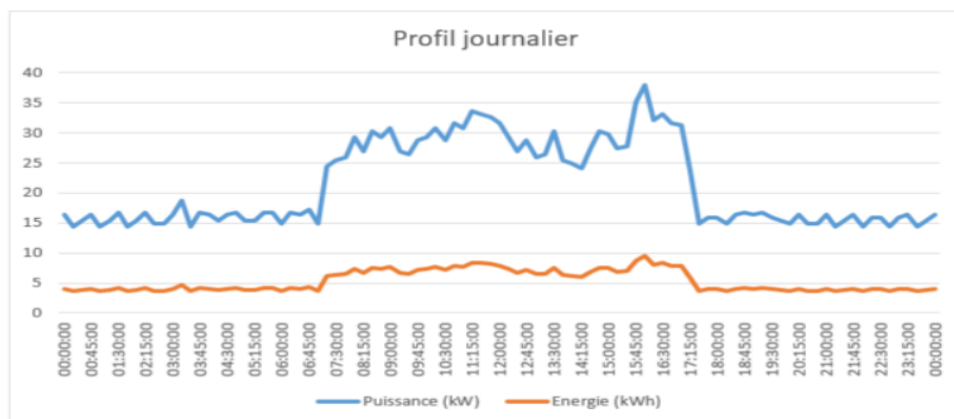
```
function [C,t]= interpolation(U_l,U_b,U_i)
% C est la courbe de charge totale de l'interpolation de la charge
% foisonnée issue des usages du logement, des bureaux et des industries
[C_t_l,t_l] = foisonnement( U_l,300);
[C_t_b,t_b] = foisonnement( U_b,200);
[C_t_i,t_i] = foisonnement( U_i,3 );

t1=sort(unique([t_b,t_l]));
C_t_l_i=interp(t_l,C_t_l,t1) ;
C_t_b_i=interp(t_b,C_t_b,t1) ;
C_t_l_b=C_t_l_i+C_t_b_i;
t_q=sort(unique([t1,t_i]));
C=(interp(t1,C_t_l_b,t_q)+interp(t_i,C_t_i,t_q));
t=t_q ;
plot(t,C);
```

Annexe 4 : Allure de la consommation d'électricité nationale (RTE)



Annexe 5 : Allure de la consommation d'électricité journalière d'un logement (Questions d'énergie,2020)



Annexe 6, 7, 8 : Code de l'offre énergétique, la vitesse du vent à la normale du rotor ainsi que le rayonnement direct.

```
function [O_t]=offre(D,n,S) %en fonction du diametre et du nombre d'éolienne
%ainsi que dela surface des panneaux
omega_t=[ 3.8
4
4.6
5
4.6
5
4.55
4
4
3.8
];
%Vitesse à la normale de l'éolienne en m/s
rho_e=0.2;
%rendement éolienne
rho_s=0.2;
%Rendement panneaux
y=[ 0
0
0
0
29.79
104.81
249.63
400.96
539.37
608.14
692.46
705.21
658.98
592.45
497.55
366.02
216.09
77.31
21.19
0
0
0
0
];
%Rayonnement solaire en W/m²
t_e=[ 0
2
5
8
11
14
17
20
23
24
];
%instant puissance éolienne en h
```

```

1.04347826086957
2.08695652173913
3.1304347826087
4.17391304347826
5.21739130434783
6.26086956521739
7.30434782608696
8.34782608695652
9.39130434782609
10.4347826086957
11.4782608695652
12.5217391304348
13.5652173913043
14.6086956521739
15.6521739130435
16.695652173913
17.7391304347826
18.7826086956522
19.8260869565217
20.8695652173913
21.9130434782609
22.9565217391304
    24

];
%instants puissance solaire
t=sort(unique([t_s;t_e]));
O_t_e=n*omega_t.^3*D.^2*rho_e*0.37*(3.14).^4;
O_t_s=S*rho_s*y ;
O_t_e_i = interp1(t_e,O_t_e,t) ;
O_t_s_i = interp1(t_s,O_t_s,t) ;
O_t=O_t_s_i+O_t_e_i ;
t_O=t ;

```

Annexe 9 : Code qui définit l'ensemble des offres possibles

```

O_test=[];
IntegO=[]
t=sort(unique([t_O,t_D]));
D_t_i=interp1(t_D,D_t,t,'linear');

for i=1:10000;
    D=randi([15,60]);
    n=randi([1,10]);
    S=randi([500,10000]);
    %tirage aléatoire sources énergie
    O= offre(D,n,S);
    %calcul par la fonction offre
    O=O.';
    O_t_i=interp1(t_O,O,t,'linear');
    %offre interpellé pour la comparer à la demande
    if sum(O(2:end).*diff(t_O))-sum(D_t(2:end).*diff(t_D))>0
        %on regarde si l'intégrale O>D
        if O_t_i>D_t_i
            %offre>demande en tout point
            O_test=[O_test;O];
            IntegO=[IntegO,[sum(O(2:end).*diff(t_O));D;n;S]];
            %ressort l'intergrale, le diamètre, le nb d'éol et la surface
        end
    end
end
end

```

Annexe 10 : Exemple de résultat sous forme de tableur

	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Energie (Wh)	1.2575e+08	5.3478e+07	1.9134e+08	1.6678e+08	8.7395e+07	4.8161e+08	4.3216e+07	1.3723e+08	2.4622e+08
Diamètre (m)	29	18	44	41	25	55	22	32	50
Nb éoliennes	9	9	6	6	8	10	5	8	6
Surface (m²)	5882	6460	7659	7182	7491	6054	4390	7311	9169

Directeur de recherche :

Mindjid Maizia

Pierre Bertin

PFE/DAE5

DAE/RESEAU

2021-2022

Optimisation de l'offre énergétique électrique d'origine 100% renouvelable

Réponse de l'offre à la demande par foisonnement et minimisation du surplus à l'échelle territoriale

Résumé :

L'objectif de ce projet de fin d'études est d'étudier la possibilité de répondre à une demande énergétique d'un territoire par une offre composée à 100% d'énergie renouvelable.

Dans un premier temps, on définit la zone d'étude qui représente la demande énergétique du territoire à satisfaire. Cette zone est théorique, un quartier composé de 300 logements, 200 bureaux et 3 industries. Chaque secteur du quartier a une courbe de charge de la consommation globale obtenue par le foisonnement de l'ensemble des courbes de charges chaotiques de chaque individu. La demande totale du quartier est l'interpolation et l'agrégation de ces trois courbes. Cette mutualisation des demandes fond les pics énergétiques individuels des secteurs dans la demande totale de l'ensemble. La consommation énergétique globale du quartier est alors minimale pour un réseau totalement centralisé.

Dans un second temps, afin de répondre à cette demande, une fonction permet de trouver l'offre optimisée composée à 100% d'énergie renouvelable. Sachant que seul l'énergie éolienne et solaire sont disponibles sur la zone d'étude, la fonction définit les caractéristiques de chaque système de production, soit le nombre d'éoliennes et le diamètre des rotors ainsi que la surface de panneaux solaires. De plus, la demande peut être encore modifiée pour minimiser le surplus entre l'offre et la demande en appliquant de l'effacement diffus sur certains usages spécifiques. Cet effacement permet de diminuer l'offre énergétique de 22% ainsi que le surplus de moitié.

Mots Clés :

Offre énergétique
Demande énergétique
Energie renouvelable
Foisonnement
Effacement diffus