

Répartition optimale d'acteurs énergétiques en communautés d'autoconsommation collective

Youen FROGER, Anthony ROY, Jean-Christophe OLIVIER, Salvy BOURGUET, François AUGER

Nantes Université, Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes Atlantique, IREENA, UR 4642, F-44600 Saint-Nazaire, France

youen.froger@univ-nantes.fr

RESUME – La multiplication à la fois du nombre et de l'échelle des communautés d'autoconsommation collective nécessite de les considérer non plus comme isolées mais en tant que partie d'un écosystème local tel qu'un quartier ou une ville. Une première étape pour y parvenir est de considérer la formation de plusieurs communautés. Dans cet article, nous proposons une approche d'optimisation pour la répartition d'acteurs entre plusieurs communautés, et nous comparons sur un cas fictif deux fonctions objectif possibles. La première consiste en la minimisation de la somme des coûts totaux payés par les acteurs. La seconde consiste en la maximisation des économies réalisées par l'acteur réalisant le moins d'économies. Pour réaliser cette répartition, les échanges économiques inter-acteurs sont également optimisés. Finalement nous analysons le nombre maximal d'acteurs que cette méthode peut prendre en compte.

Autoconsommation collective, communautés énergétiques, répartition optimale, partage énergétique, énergies renouvelables

NOMENCLATURE

Ensembles

- N_{ens} Nombre d'éléments de l'ensemble ens . Par exemple, N_A est le nombre d'acteurs de l'ensemble A
- $A \{a_i\}$ Ensemble des acteurs (a_i est le i -ème acteur de l'ensemble)
- $C \{c_j\}$ Ensemble des communautés potentielles (c_j est la j -ème communauté potentielle de l'ensemble)
- A_{c_j} Ensemble des acteurs qui peuvent rejoindre la communauté c_j
- C_{a_i} Ensemble des communautés que a_i pourrait rejoindre
- $T \{t_k\}$ Ensemble des instants (t_k est le k -ème instant considéré)

Énergie

- $E_{a_i}(c_j, t_k)$ Énergie achetée par a_i à c_j à l'instant t_k (les valeurs négatives signifient que l'énergie a été vendue à c_j)
- $E_{a_i}(S, t_k)$ Énergie achetée par a_i au fournisseur de complément S à l'instant t_k (les valeurs négatives signifient que l'énergie a été vendue à l'acheteur de surplus S)
- $E_{a_i}(\text{cible}, t_k)$ Besoins énergétiques de a_i à l'instant t_k (les valeurs négatives représentent un surplus de production à vendre, et les valeurs positive représentent un déficit de production à acheter). Il s'agit de l'énergie que a_i cherche à échanger à l'instant t_k

Participation

- $\text{Part}_{a_i}(c_j)$ Ratio de participation de a_i à c_j

Coûts

- $\Delta \text{Cout}_{a_i}(t_k)$ Économies réalisées par a_i du fait de sa participation à une communauté

$\text{Cout}_{a_i}(t_k)$ Coûts énergétiques pour a_i à l'instant t_k (les valeurs positives signifient le coût assumé par l'acteur, tandis que les valeurs négatives signifient qu'un profit a été réalisé)

Prix

- $\pi_{C,b}$ Prix auquel les acteurs achètent leur énergie aux communautés d'énergie
- $\pi_{C,s}$ Prix auquel les acteurs vendent leur énergie aux communautés d'énergie
- $\pi_{S,b}(a_i)$ Prix auquel a_i achète son énergie à son fournisseur de complément S
- $\pi_{S,s}(a_i)$ Prix auquel a_i vend son énergie à son acheteur de surplus S

1. INTRODUCTION

La transition énergétique en cours a soulevé de nouvelles questions pour la gestion des futurs réseaux électriques. Les risques de congestion [1][2], l'intermittence de la production [1][3], la multiplication des acteurs rendant leur coordination plus difficile [2], la nécessité de flexibilité [1] et la nécessité d'une appropriation citoyenne [1] en font partie. Décentraliser la résolution du problème de gestion d'énergie permet de résoudre certaines problématiques [2]. Les opérations d'Autoconsommation Collective (ACC) sont un outil de décentralisation du problème de gestion de l'énergie qui permet d'impliquer les citoyens. Ces opérations d'ACC incitent leurs participants à réaliser un équilibre local entre production et consommation en récompensant leurs participants par des tarifs d'achats d'électricité plus faibles lorsqu'ils auto-consomment l'énergie produite au sein de la communauté.

Bien que les communautés d'énergie aient fait l'objet de nombreux travaux de recherche [4], des questions restent peu étudiées concernant la formation optimale de communautés [5] ainsi que les interactions entre communautés [4]. Disposer de méthodes de formation optimale de plusieurs communautés permettrait, entre autres, d'étudier la taille optimale de ces communautés et d'aider à leur conception, en particulier si elles doivent co-exister localement. Étudier les groupes formés par ces méthodes permettrait également de récolter des informations utiles pour comprendre ce qui rend les communautés efficaces, comme par exemple la diversité de leurs acteurs ou les règles de répartition de l'énergie. Sur ce sujet, Mariuzzo et al. proposent dans [6] que certains acteurs puissent participer à de multiples communautés afin de leur permettre d'atteindre de meilleurs résultats, montrant que la coopération entre communautés peut être utile. Considérer la formation simultanée de plusieurs communautés permet également la comparaison entre plusieurs objectifs à des échelles différentes (échelle de l'acteur, échelle de la communauté, échelle de la zone locale). Dans [5], Mustika et al. ont proposé une méthode se basant sur des heuristiques pour l'expansion d'une communauté. Dans [3], Bandara et al. ont proposé une méthodologie basée sur la théorie des jeux pour la for-

mation de coalitions. Cependant les coalitions énergétiques formées avec cette méthode changent à intervalles réguliers courts (cinq minutes), les rendant inappropriées pour les opérations d'ACC réelles. Dans [7], Harighi et al. ont étudié l'impact que pourraient avoir de multiples communautés sur les flux de puissance et les coûts. Dans leur méthode, chaque utilisateur cherche à minimiser ses coûts. Cependant les acteurs sont attribués aléatoirement entre les communautés. Comme identifié dans la littérature, il reste donc des problématiques à traiter concernant la formation optimale de communautés.

Ainsi, es contributions de cet article sont :

- La définition d'une méthode de répartition optimale des acteurs entre plusieurs communautés potentielles et une optimisation de leurs échanges d'énergie.
- La formulation et la comparaison de deux fonctions objectif. L'une est la minimisation des coût collectifs et la seconde est la maximisation des économies réalisées par l'acteur réalisant le moins d'économies.

Cet article est organisé comme suit : La modélisation des acteurs et de leurs communautés d'énergie potentielles est présentée dans la section 2. Ensuite, la formulation et la résolution du problème d'optimisation sont présentées dans la section 3. Le cas d'étude et les résultats sont présentés dans la section 4. Finalement, l'approche et ses limites sont discutées dans la section 5.

2. MODÉLISATION DES COMMUNAUTÉS

2.1. Des communautés potentielles aux communautés réelles

L'objectif de cet article étant de répartir des acteurs entre plusieurs communautés d'énergie potentielles, il est nécessaire de définir ce qu'est une communauté potentielle. Une communauté potentielle est un ensemble d'acteurs qui pourraient former une communauté. Tous les acteurs qui sont dans une même communauté potentielle ne sont pas forcés de participer à ladite communauté. Il en résulte que, après optimisation, les communautés formées ne contiendront pas toujours tous les acteurs qui étaient dans la communauté potentielle d'où la communauté formée est issue. Une communauté est considérée formée si et seulement si elle contient au moins deux acteurs, qui échangent de l'énergie à travers elle. L'essentiel à retenir est que les communautés potentielles représentent les choix possibles pour chaque acteur. Dans cet article, un critère géographique basé sur la législation française pour les opérations d'ACC est utilisé afin de définir les communautés potentielles.

2.2. Hypothèses

L'approche proposée se base sur plusieurs hypothèses. La première d'entre elles est de considérer les acteurs comme non-flexibles (ils ne peuvent pas décaler leur consommation et ne disposent pas de moyen de stockage). Seul l'aspect économique est considéré, peu importe l'état physique des échanges sur le réseau. En effet, les opérations d'ACC attribuent *a posteriori* les échanges d'énergie, en se basant uniquement sur la quantité d'énergie produite ou consommée, par intervalle d'une demi-heure. Seule l'énergie manquante et le surplus de production des acteurs sont considérés, et il n'y a pas de distinction explicite de modélisation entre un producteur et un consommateur. Il en résulte qu'un acteur pourrait être un consommateur à un instant t_k , mais un producteur à l'instant suivant t_{k+1} . Enfin, il n'y a pas de fluctuation des tarifs de l'énergie sur la période considérée.

2.3. Acteurs

Chaque acteur a_i est caractérisé par :

- La série temporelle de l'énergie que l'acteur a besoin d'acheter ou de vendre ;
- Le tarif de vente du fournisseur de complément $\pi_{S,b}(a_i)$;
- Le tarif d'achat de l'acheteur de surplus $\pi_{S,s}(a_i)$;
- L'ensemble de ses communautés potentielles C_{a_i} .

2.4. Coûts

Le coût payé par l'acteur a_i à chaque instant t_k est calculé comme suit

$$\begin{aligned} \text{Cout}_{a_i}(t_k) = & \pi_{S,s}(a_i) \min(0, E_{a_i}(S, t_k)) \\ & + \pi_{S,b}(a_i) \max(0, E_{a_i}(S, t_k)) \\ & + \sum_{c_j \in C_{a_i}} \pi_{C,s} \min(0, E_{a_i}(c_j, t_k)) \\ & + \sum_{c_j \in C_{a_i}} \pi_{C,b} \max(0, E_{a_i}(c_j, t_k)) \end{aligned} \quad (1)$$

Il s'agit de la somme des achats d'énergie réalisés par l'acteur moins la somme de ses ventes d'énergie.

Pour calculer les économies réalisées du fait de la participation aux communautés d'énergie, on calcule le coût pour chaque acteur dans un scénario sans communautés et on lui soustrait le coût obtenu en la présence de communautés :

$$\begin{aligned} \Delta \text{Cout}_{a_i}(t_k) = & \pi_{S,s}(a_i) \min(0, E_{a_i}(\text{cible}, t_k)) \\ & + \pi_{S,b}(a_i) \max(0, E_{a_i}(\text{cible}, t_k)) \\ & - \text{Cout}_{a_i}(t_k) \end{aligned} \quad (2)$$

3. FORMULATION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION

L'objectif est de trouver la répartition optimale des acteurs au sein des communautés potentielles ainsi que celle de leurs échanges d'énergie. Pour réaliser cet objectif, un problème d'optimisation de type est formulé comme suit Un problème d'optimisation de type *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) est formulé. La solution de ce problème est la répartition optimale des acteurs au sein des communautés potentielles et l'optimisation de leurs échanges d'énergie.

3.1. Variables de décision

Les variables de décision sont :

- La quantité d'énergie échangée par chaque acteur a_i avec le fournisseur de complément et l'acheteur de surplus S à chaque instant t_k : $E_{a_i}(S, t_k)$;
- L'énergie que chaque acteur a_i échange avec chacune de ses communautés potentielles (c_j) à chaque instant t_k : $E_{a_i}(c_j, t_k)$;
- La participation de chaque acteur a_i à chacune de ses communautés potentielles c_j : $\text{Part}_{a_i}(c_j)$. Il s'agit d'une variable entière représentant le taux de participation de a_i à la communauté c_j . Ce taux de participation est fixe pour tout l'espace de temps et fixe une borne supérieure sur la proportion de ses besoins énergétiques que l'acteur peut se fournir auprès de la communauté c_j . En pratique, la participation devient une variable logique car un acteur ne peut rejoindre qu'une seule communauté. Avec un taux de participation $\text{Part}_{a_i}(c_j) = 100\%$.

3.2. Fonctions objectifs

Deux fonctions objectif sont considérées dans cet article :

- f_1 , la somme des dépenses moins les revenus de chaque acteur (fonction à minimiser) :

$$f_1 = \sum_{a_i \in A} \sum_{t_k \in T} \text{Cout}_{a_i}(t_k) \quad (3)$$

- f_2 , la somme des économies (par rapport à la situation sans communautés) réalisées par l'acteur qui réalise le moins d'économies (fonction à maximiser).

$$f_2 = \min_{a_i \in A} \sum_{t_k \in T} \Delta \text{Cout}_{a_i}(t_k) \quad (4)$$

3.3. Contraintes

Le problème d'optimisation est sujet aux contraintes suivantes :

- Les acteurs doivent acquérir toute l'énergie dont ils ont besoin :

$$\forall a_i \in A, \forall t_k \in T, \\ E_{a_i}(\text{cible}, t_k) - E_{a_i}(S, t_k) - \sum_{c_j \in C_{a_i}} E_{a_i}(c_j, t_k) = 0 \quad (5)$$

- Le taux de participation d'un acteur à une communauté ne peut ni être négatif, ni dépasser 100% :

$$\forall a_i \in A, \forall c_j \in C_{a_i}, 0 \leq \text{Part}_{a_i}(c_j) \leq 1 \quad (6)$$

Comme $\text{Part}_{a_i}(c_j)$ est une variable entière, cela se traduit en pratique par le fait que cette variable ne peut prendre que 2 valeurs : 0 et 1. Elle devient donc une variable logique.

- Les acteurs participent à une seule communauté :

$$\forall a_i \in A, 0 \leq \sum_{c_j \in C_{a_i}} \text{Part}_{a_i}(c_j) \leq 1 \quad (7)$$

- La quantité d'énergie qu'un acteur peut échanger avec une communauté ne peut excéder la limite fixée par son taux de participation et ses besoins :

$$\forall a_i \in A, \forall c_j \in C_{a_i}, \forall t_k \in T, \\ |E_{a_i}(c_j, t_k)| \leq \text{Part}_{a_i}(c_j) |E_{a_i}(\text{cible}, t_k)| \quad (8)$$

- La quantité d'énergie qu'un acteur peut échanger avec le fournisseur de complément et l'acheteur de surplus ne peut excéder ses besoins :

$$\forall a_i \in A, \forall c_j \in C_{a_i}, \forall t_k \in T, \\ |E_{a_i}(S, t_k)| \leq |E_{a_i}(\text{cible}, t_k)| \quad (9)$$

- Les communautés d'énergie ne peuvent ni produire ni stocker de l'énergie. Elles doivent donc, à chaque instant, acheter toute l'énergie qu'elles vendent et vendre toute l'énergie qu'elles achètent.

$$\forall c_j \in C_{a_i}, \forall t_k \in T, \\ \sum_{A_i} E_{a_i}(c_j, t_k) = 0 \quad (10)$$

- Un acteur ne peut pas acheter et vendre de l'énergie au même instant. $E_{a_i}(\text{cible}, t_k)$, $E_{a_i}(c_j, t_k)$ et $E_{a_i}(S, t_k)$ sont donc de même signe à chaque instant t_k .

4. APPLICATION À UN CAS D'ÉTUDE ET RÉSULTATS

4.1. Cas d'étude

Le cas fictif étudié dans cet article est composé de trois types d'acteurs énergétiques, afin d'assurer une diversité des profils énergétiques et des coûts : 5 producteurs (afin de fournir de l'énergie aux communautés), 16 consommateurs résidentiels (qui ont une faible consommation et un tarif d'achat plus élevé que les consommateurs professionnels) et 3 consommateurs professionnels (qui ont une consommation élevée et un tarif d'achat plus faible que les consommateurs résidentiels).

La méthode utilisée pour définir les communautés potentielles est une méthode géographique. Chaque producteur est le centre d'une communauté potentielle qui inclut tous les acteurs situés dans un rayon d'un kilomètre. Cette méthode de construction a été choisie pour des raisons de lisibilité, car l'objectif de

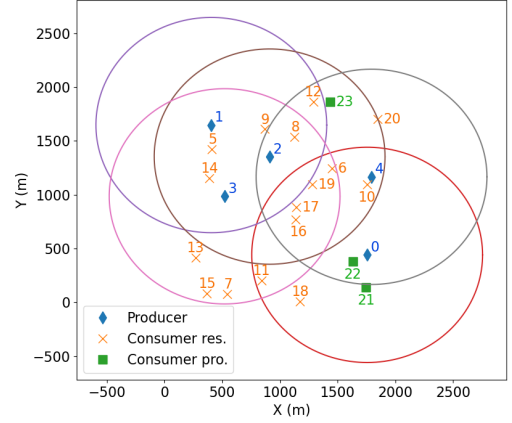


FIG. 1. Positions des acteurs et des communautés potentielles dans le cas d'étude considéré.

cet article est de répartir les consommateurs entre les communautés potentielles et non de les construire. Cette méthode limite la quantité de communautés potentielles à considérer. Le fait de limiter le nombre de communautés potentielles considérées est nécessaire, car la quantité de communautés potentielles que l'on pourrait constituer admet comme borne supérieure

$$\sum_{k=1}^{N_a} \binom{N_a}{k} = 2^{N_a} - 1 \quad (11)$$

On peut déduire de cette équation que dans le cas où l'on considère toutes les communautés possibles, le nombre de communautés potentielles devient trop important avec seulement quelques acteurs proches.

Les profils de production et de consommation des différents acteurs proviennent de 3 sources différentes : ELMAS [8] pour les consommateurs professionnels, EtudElec [9] pour les consommateurs résidentiels et Sundance [10] pour les producteurs solaires. Les profils utilisés sont basés sur une journée de données horaires. Pour chacune de ces bases de données, des profils ont été sélectionnés aléatoirement (5 producteurs, 16 consommateurs résidentiels et 3 consommateurs professionnels). Une mise à l'échelle de la production a ensuite été réalisée afin que la moyenne de la production corresponde à la moyenne de la consommation. Afin de réaliser la répartition géographique des acteurs, ils ont été placés aléatoirement dans un espace carré de deux kilomètres de côté. Les répartitions qui ne permettaient pas à chaque acteur d'être dans au moins une communauté ont été ignorées. La localisation finale des acteurs est représentée dans la figure 1. Les communautés potentielles y sont représentées par des cercles. Les propriétés des acteurs sélectionnés sont résumés dans le tableau 2 ainsi que dans la figure 2.

Les tarifs du fournisseur de complément et de l'acheteur de surplus ont été assignés par catégorie, et leurs valeurs peuvent être trouvées dans le tableau 1. Les tarifs d'achat et de vente auprès des communautés sont uniformes sur tous les acteurs. Le tarif d'achat est $\pi_{C,b} = 0.21$ €/kWh et celui de vente est $\pi_{C,s} = 0.20$ €/kWh. Il convient de noter que, tant que les tarifs sont dans les mêmes ordres de grandeur, seul l'ordre des tarifs a une importance.

TABLEAU 1. tarifs du fournisseur de complément et de l'acheteur de surplus pour tous les a_i

catégorie	$\pi_{S,s}(a_i)$ (€/kWh)	$\pi_{S,b}(a_i)$ (€/kWh)
Producteur	0.1024	0.2516
Consommateur res.	0.1024	0.2516
Consommateur pro.	0.1124	0.2406

TABLEAU 2. Caractéristiques des acteurs

id	nom dans la BDD	catégorie	énergie totale (kWh)
0	SD_100703	Producteur	-1479
1	SD_1002705	Producteur	-1003
2	SD_1001554	Producteur	-886
3	SD_100704	Producteur	-861
4	SD_1002705	Producteur	-2393
5	EE_district_heating_apartment	Consommateur res.	4
6	EE_fuel-oil_apartment	Consommateur res.	6
7	EE_fuel-oil_apartment	Consommateur res.	6
8	EE_district_heating_apartment	Consommateur res.	2
9	EE_heat-pump_apartment	Consommateur res.	6
10	EE_other_house	Consommateur res.	15
11	EE_gas_apartment	Consommateur res.	5
12	EE_electricity_apartment	Consommateur res.	7
13	EE_wood-pellets_house	Consommateur res.	13
14	EE_district_heating_apartment	Consommateur res.	4
15	EE_electricity_house	Consommateur res.	15
16	EE_fuel-oil_house	Consommateur res.	4
17	EE_district_heating_apartment	Consommateur res.	4
18	EE_other_house	Consommateur res.	9
19	EE_district_heating_apartment	Consommateur res.	4
20	EE_gas_apartment	Consommateur res.	2
21	ELMAS_8	Consommateur pro.	2607
22	ELMAS_4	Consommateur pro.	2091
23	ELMAS_2	Consommateur pro.	1810

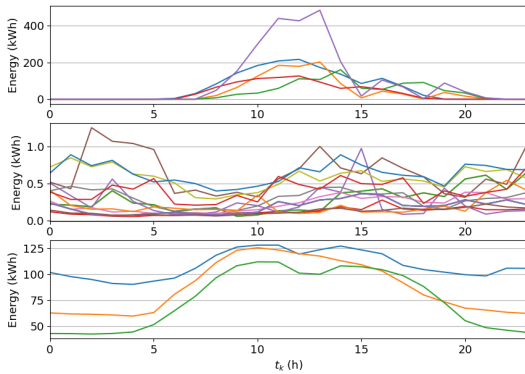
FIG. 2. Série temporelle de la production et la consommation d'énergie (abs(E_{a_i} (cible, t_k)), groupé par catégorie (en haut : producteur, au milieu : consommateurs résidentiels, en bas : consommateurs professionnels))

TABLEAU 3. Résumé des résultats

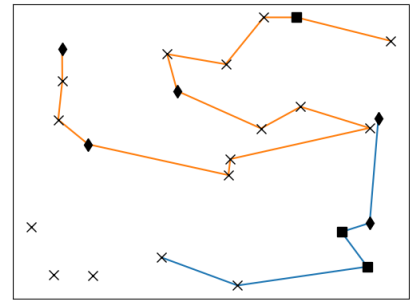
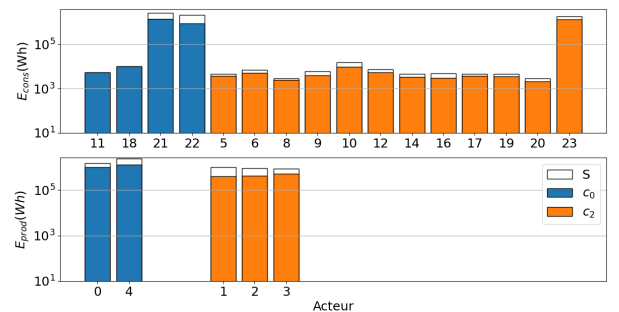
Objectif	f_1 (€)	f_2 (€)	Bénéfices totaux (€) ↑	Coefficient de Gini ↓	Temps de calcul (s) ↓
min f_1	453	0	462	0.23	974
max f_2	573	0.12	343	0.15	452

4.2. Résultats

Le problème MILP précédemment proposé a été résolu en utilisant le solveur HIGHS [11], à travers la bibliothèque python `scipy.optimize.milp`. Les acteurs ont été attribués au sein des communautés constituées, en se basant sur chaque objectif. Les figures 3 et 5 sont des cartes représentant les regroupements qui ont été effectués, respectivement pour les objectifs f_1 et f_2 . Dans ces figures, les agents connectés par un trait de la même couleur appartiennent à la même communauté. Les échanges énergétiques sont résumés dans la figure 4 et la figure 6, respectivement pour les objectifs f_1 et f_2 . Un résumé des résultats obtenus en optimisant avec chacun des deux objectifs est disponible dans le tableau 3.

Les communautés optimales à former diffèrent selon l'objectif considéré. En prenant pour objectif f_1 (minimisation de la somme des coûts payés par les acteurs), trois acteurs ne participent à aucune communauté et seules deux communautés sont formées. Tous les producteurs sont inclus. En effet, pour cet objectif, seuls la quantité d'énergie et le prix auquel cette quantité est échangée ont de l'importance. On peut également remarquer que s'il était possible de former une seule communauté contenant tous les acteurs, alors elle serait optimale car elle permettrait à tous les acteurs d'échanger en son sein. Avec f_1 comme objectif, il y a un risque d'aboutir à une répartition de l'énergie non-équitable (par exemple en favorisant les professionnels, ou en favorisant un acteur sur un autre), étant donné qu'aucun critère d'équité n'est considéré dans l'objectif.

Dans le cas étudié, les consommateurs professionnels ont un prix par Wh moins élevé que les consommateurs résidentiels. Les consommateurs résidentiels sont donc priorisés, car, à quantité d'énergie égale ils représentent une plus grande diminution de f_1 . Cela vient donc en partie atténuer la répartition inéquitable. Celle-ci n'est cependant pas totalement effacée par cet écart de tarifs d'achat de l'électricité étant donné que la quantité d'énergie échangeable avec un consommateur professionnel est beaucoup plus importante. Il en ressort l'importance, lorsqu'on a f_1 pour objectif, de la répartition des tarifs d'achats auprès des fournisseurs de compléments ou des communautés entre les différents acteurs.

FIG. 3. Communautés constituées en utilisant la fonction objectif f_1 .FIG. 4. Énergie échangée en avec les communautés et le fournisseur de complément/acheteur de surplus en utilisant la fonction objectif f_1 .

Lorsque l'on prend pour objectif f_2 (la maximisation des économies réalisées par l'acteur qui réalise le moins d'économies), tous les acteurs vont forcément participer à une communauté. En effet, si un acteur venait à ne pas participer (par exemple s'il ne le pouvait pas), alors il ne réaliserait pas d'économies du fait de la présence des communautés d'ACC, fixant la valeur de f_2 à 0. Par conséquent, si un acteur ne peut participer à aucune communauté, tous les groupements d'acteurs sont équivalents et optimaux du point de vue de f_2 . Il faut donc s'assurer que si l'on utilise f_2 , tous les acteurs se situent dans au moins une communauté potentielle qui possède un producteur.

Dans le cas étudié, cette contrainte empêche de ne pas inclure les 3 acteurs en bas à gauche, empêchant donc de former la grande communauté c_2 (qui est formée avec f_1 comme objectif dans la figure 3). Cette communauté permet aux producteurs de vendre leur énergie au consommateur professionnel a_{23} . L'absence de la grande communauté c_2 force donc les producteurs à vendre plus d'énergie à l'acheteur de surplus.

5. DISCUSSION ET LIMITES

Dans le tableau 3, on constate que les coefficients de Gini [12], marqueurs d'inégalités, sont significativement plus faibles pour l'objectif f_2 que pour l'objectif f_1 . Cela signifie que l'objectif f_2 réduit les inégalités observées par rapport à f_1 . L'objectif f_2 réduit également significativement les économies réalisées (par rapport à f_1) par l'ensemble des acteurs, en particulier celles réalisées par les consommateurs professionnels. On peut remarquer que les économies réalisées par les acteurs qui n'étaient pas inclus sont très faibles (0.12€) et que la différence d'économies réalisées est beaucoup plus élevée (121€).

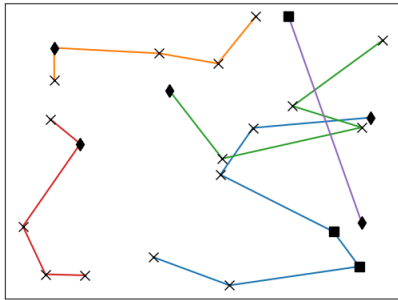


FIG. 5. Communautés constituées en utilisant la fonction objectif f_2 .

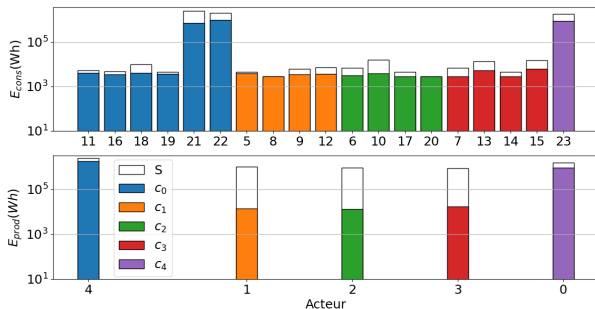


FIG. 6. Énergie échangée en avec les communautés et le fournisseur de complément/acheteur de surplus en utilisant la fonction objectif f_2 .

Optimiser les échanges réalisés par les communautés générées en utilisant f_2 au moyen de l'objectif f_1 n'a pas augmenté les économies réalisées par l'ensemble des acteurs. On peut en déduire que la baisse dans les économies réalisées par l'ensemble des acteurs est due au choix des communautés constituées au moyen de f_2 , plus petite, et non seulement car, du point de vue de f_2 , les économies réalisées par les acteurs qui en réalisent plus que l'acteur qui en réalise le moins sont ignorées. Les

plus faibles économies réalisées dans le cas de f_2 sont réalisées par l'acteur a_7 (celui en bas à gauche de la communauté c_3).

Les autres communautés ne contribuent donc pas à f_2 , tant que leurs acteurs font plus d'économies que a_7 . Par conséquent, il est possible d'augmenter les économies totales, sans dégrader f_2 en modifiant les communautés constituées. Un exemple de changement est la fusion de c_1 et c_2 , qui permet d'augmenter de 20 € les économies réalisées (comparé à f_2 seul), sans changer la valeur de f_2 .

Si un acteur n'a besoin que d'une faible quantité d'énergie pour l'objectif f_2 , ou que la production et la consommation sont très différentes pour l'objectif f_1 , alors une grande variété de solutions sont équivalentes et optimales. Une méthode possible pour discriminer ces solutions serait un objectif composée d'une somme pondérée de f_1 et f_2 , avec un poids attribué à l'un négligeable devant l'autre.

L'approche proposée dans cet article permet également d'attribuer des acteurs à de multiples communautés. Cela peut être fait de deux manières distinctes :

- Permettre aux acteurs de participer à toutes leurs communautés potentielles en même temps, tout en limitant la quantité d'énergie qui peut être échangée avec chacune d'entre elles en relaxant la contrainte qui force $\text{Part}_{a_i}(c_j)$ à prendre des valeurs entières.
- Permettre aux acteurs de rejoindre intégralement plusieurs communautés en changeant la borne supérieure de l'équation (7). cette valeur devient alors la quantité de communautés que l'acteur a_i peut rejoindre. Comme cette valeur est définie pour chaque acteur, il est possible de n'autoriser la participation à de multiples communautés qu'à certains acteurs stratégiques.

5.1. Limites matérielles

Bien que l'approche proposée garantit une solution optimale au problème en considérant la fonction objectif choisie, la complexité en mémoire de cette approche ($\mathcal{O}(N_A N_C N_T)$ variables de décision et $\mathcal{O}(N_A N_C N_T)$ contraintes) la rend non adaptée pour de plus grands problèmes. Afin d'illustrer cela, pour chaque nombre de jours, une méthode dichotomique a été utilisée afin de trouver le plus grand N_A pour lequel le problème peut être résolu sans problèmes dus à un manque de mémoire. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 7. Il convient de noter que le problème qui a été utilisé pour construire cette figure est légèrement différent. En effet, dans ce problème, il y a 30 % de producteurs, 70 % de consommateurs, et tous les acteurs sont le centre de communautés potentielles. Cela augmente N_C , rendant cette formulation plus pessimiste que le cas présenté dans cet article quant au nombre maximal d'acteurs qui peuvent être traités pour chaque nombre de jours donnés. Cependant, cela ne change pas les conclusions générales, car la même approche pourrait être réalisée et donnerait des résultats similaires, à un facteur multiplicatif près, sous condition que le nombre de producteurs (et donc de communautés potentielles) soit proportionnel au nombre total d'acteurs.

Ces calculs ont été réalisés sur un ordinateur possédant 15 GiO de RAM + 1 GiO de Swap, lui donnant un total de 16 GiO de mémoire de travail. La quantité de mémoire de travail était toujours le facteur limitant, car le plus long temps de calcul mesuré en produisant la figure 7 était de 45 minutes sur un seul fil d'exécutions sur un processeur I9-13900. Les temps d'accès à la mémoire swap sont significativement plus lents comme il s'agit de mémoire sauvegardée sur le disque (SSD), mémoire qui est plus lente d'au moins un ordre de grandeur. Nous supposons que l'essentiel de ces 45 minutes est consacré aux transferts de données entre la RAM et le disque (SWAP). Ce temps de calcul n'étant pas prohibitif, et serait plus faible sans utiliser de swap, le temps de calcul n'était donc pas le critère dans l'évaluation du nombre maximum pour lequel le problème pouvait être résolu.

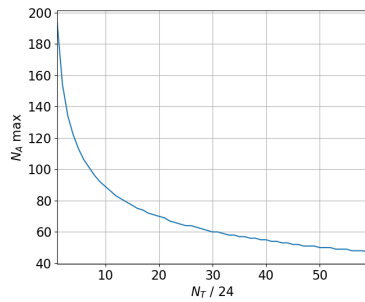


FIG. 7. Borne inférieure du plus grand N_A pour chaque N_T

6. CONCLUSION

Dans cet article, une méthodologie permettant l'attribution optimale d'acteurs énergétiques entre plusieurs communautés potentielles a été proposée. Deux fonctions objectif ont également été proposées et comparées. Les échanges énergétiques entre les différents acteurs ont également été optimalement répartis, car ils font partie du processus d'optimisation. La comparaison des fonctions objectif a montré que, dans un ensemble d'acteurs variés, ne prendre en compte que l'acteur qui réalise le moins de bénéfices du fait de sa participation dégrade grandement les résultats du groupe.

La méthodologie proposée peut être appliquée à des problèmes de relativement petite échelle. Le facteur limitant est la mémoire de travail. La limite, en considérant chaque acteur comme étant le centre d'une communauté potentielle, est de 60 acteurs au sein de 60 communautés potentielles, en considérant 30 jours de référence (sur un ordinateur doté de 16 GiO de mémoire de travail).

Afin d'améliorer d'avantage la répartition d'acteurs en groupes, le travail futur pourrait prendre la flexibilité des acteurs en compte. En effet, les sources de flexibilité, telles que la gestion de la demande ou l'ajout de batteries, n'ont pas été prises en compte dans cet article. Le choix de ne pas les prendre en compte a été fait afin de ne pas augmenter la complexité du problème d'optimisation et par conséquent de limiter encore plus la quantité maximale d'acteurs pouvant être pris en compte. Afin de la prendre en compte sans impacter le nombre maximal d'acteurs qui peuvent être considérés, une autre approche serait nécessaire. Il serait également intéressant d'investiguer le dimensionnement et la gestion de stockage mutualisé.

Il serait également utile d'augmenter la résilience de la solution obtenue, notamment au moyen de méthodes stochastique ou en prenant en compte la possibilité pour un acteur de quitter une communauté, que ce soit pour en rejoindre une autre ou pour quitter l'opération d'ACC.

D'autres travaux pourront également inclure des approches de conception pour des problèmes de plus grande échelle et d'attribution des investissements.

Finalement, il pourrait être utile d'investiguer d'autres fonctions objectif et d'appliquer cette approche à plus de cas d'usages.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-22-PETA-009 (projet FLEX-TASE, PEPR TASE). Ce travail a également bénéficié de données collectées et partagées par le Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble et le Laboratoire d'Économie Appliquée de Grenoble dans le cadre du programme FLEX-TASE -ANR-22-PETA-0009- avec le soutien de l'OTE.

RÉFÉRENCES

- [1] IEA et RTE. *Conditions and Requirements for the Technical Feasibility of a Power System with a High Share of Renewables in France Towards 2050*. OECD, 2021. ISBN : 978-92-64-74764-7. DOI : [10.1787/6be9f3ac-en](https://doi.org/10.1787/6be9f3ac-en).
- [2] B. THOMAS et al. « GPU Optimisation of an Endogenous Peer-to-Peer Market with Product Differentiation ». *IEEE Belgrade PowerTech*. 2023, p. 01-07. DOI : [10.1109/PowerTech55446.2023.10202823](https://doi.org/10.1109/PowerTech55446.2023.10202823).
- [3] K. Y. BANDARA, S. THAKUR et J. BRESLIN. « Renewable Energy Integration through Coalition Formation for P2P Energy Trading ». *IEEE 3rd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*. 2020, p. 56-60. DOI : [10.1109/REPE50851.2020.9253870](https://doi.org/10.1109/REPE50851.2020.9253870).
- [4] T. CAPPER et al. « Peer-to-peer, community self-consumption, and transactive energy : A systematic literature review of local energy market models ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162 (2022), p. 112403. ISSN : 1364-0321. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112403>.
- [5] A. D. MUSTIKA et al. « New Members Selection for the Expansion of Energy Communities ». *Sustainability* 14.18 (2022). ISSN : 2071-1050. DOI : [10.3390/su141811257](https://doi.org/10.3390/su141811257).
- [6] I. MARIUZZO et al. « Economic assessment of multiple energy community participation ». *Applied Energy* 353 (2024). ISSN : 0306-2619. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122060>.
- [7] T. HARIGHI et al. « Optimization Model for the Analysis of Multiple Energy Communities in the Same Distribution Network with Different Providers ». *IEEE Belgrade PowerTech*. 2023, p. 1-6. DOI : [10.1109/PowerTech55446.2023.10202985](https://doi.org/10.1109/PowerTech55446.2023.10202985).
- [8] K. BELLINGUER et al. *ELMAS dataset*. 2023. DOI : [10.6084/m9.figshare.23889780.v1](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.23889780.v1).
- [9] S. OSONUGA et al. *EtudeELEC Data, aggregated electricity consumption data from 400+ residential customers in France*. Recherche Data Gouv, 2024. DOI : [10.57745/WIWMK](https://doi.org/10.57745/WIWMK).
- [10] D. CHEN et D. IRWIN. « SunDance : Black-box Behind-the-Meter Solar Disaggregation ». *Proceedings of the Eighth International Conference on Future Energy Systems*. e-Energy '17. Shatin, Hong Kong : Association for Computing Machinery, 2017, p. 45-55. ISBN : 9781450350365. DOI : [10.1145/3077839.3077848](https://doi.org/10.1145/3077839.3077848).
- [11] Q. HUANGFU et J. J. HALL. « Parallelizing the dual revised simplex method ». *Mathematical Programming Computation* 10.1 (2018), p. 119-142. DOI : [10.1007/s12532-017-0130-5](https://doi.org/10.1007/s12532-017-0130-5).
- [12] R. DORFMAN. « A Formula for the Gini Coefficient ». *The Review of Economics and Statistics* 61.1 (1979), p. 146-149. ISSN : 00346535, 15309142. DOI : [10.2307/1924845](https://doi.org/10.2307/1924845).