

# Modélisation de réseaux de distribution (DISGRID) comme outil d'étude prospectif de la combinaison de solutions de flexibilité à l'échelle transnationale

Corentin JACQUIER<sup>1</sup>, Remy RIGO-MARIANI<sup>1</sup>, Vincent DEBUSSCHERE<sup>1</sup>, Silvana MIMA<sup>2</sup>, Jean-Nicolas LOUIS<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France.

<sup>2</sup> GAEL, CNRS, Grenoble INP, INRA, Univ. Grenoble Alpes, 38000 Grenoble, France.

<sup>3</sup> VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finlande

**RESUME - L'analyse des défis de fonctionnement des réseaux électriques dans un système à forte pénétration d'énergies renouvelables variables est un des enjeux principaux de leur décarbonation. Les réseaux électriques devront ainsi s'adapter à la nouvelle localisation des unités de production et à l'évolution des flux d'énergie. Ce papier présente la modélisation et l'analyse de réseaux de distribution électrique dans un couplage des modèles POLES et Backbone afin d'évaluer le rôle des réseaux de distribution dans la combinaison des solutions de flexibilité au sein d'une étude prospective du réseau électrique européen. Ce choix de granularité de modélisation permet une meilleure compréhension des dynamiques d'évolution des réseaux électriques. Une comparaison avec le modèle EUTGRID et les données réelles est utilisée pour montrer comment le modèle développé permet une réduction des temps de calcul et une précision intéressante.**

**Mots-clés—Modèles prospectif énergétiques, réseau de distribution, power flow.**

## NOMENCLATURE

### Ensembles

$t \in T$	Ensemble des pas de temps
$n \in N$	Ensemble des nœuds
$l \in L$	Ensemble des lignes
$x \in X$	Ensemble des unités de production
$y \in Y$	Ensemble des unités de consommation
$s \in S, S \subset X \text{ et } S \subset Y$	Ensemble des unités de stockage

### Variables

$p_{t,n}^x$	Puissance produite par x (MW)
$c_{t,n}^y$	Puissance consommée par y (MW)
$f_{t,l}^P, f_{t,l}^Q$	Flux actif/réactif dans la ligne l (MW)
$v_{t,n}$	Niveau de tension (kV)
$e_{t,n}$	Quantité d'énergie dans le stockage (MWh)
$\theta_{t,n}$	Angle de tension (rad)

### Paramètres

$\pi_{t,n}^x$	Prix de production (€/MWh)
---------------	----------------------------

$dt$	Intervalle entre deux pas de temps (h)
$r_l, x_l$	Résistance, réactance de ligne ( $\Omega$ )
$g_l, b_l$	Conductance, susceptance de ligne (S)
$\eta_s$	Efficacité du stockage
$\dots$	Borne inférieure, supérieure de la variable ‘.’

## 1. INTRODUCTION

Dans un contexte de transition énergétique et une volonté de décarbonation du système électrique, il est important de favoriser l'intégration des énergies renouvelables sur le réseau. De plus, l'électrification d'autres secteurs énergétiques va accroître le stress sur les réseaux et l'intégrité de ceux-ci doit être préservée et garantie. En effet, les énergies renouvelables intermittentes étant majoritairement situées sur le réseau de distribution, elles vont introduire des contraintes jusque-là faibles ou inexistantes sur le réseau historique avec ses générateurs centralisés plutôt situés sur le réseau de transport. Des modèles énergétiques, de plus en plus nombreux, se développent dans le but d'étudier la viabilité de scénarios prospectifs du réseau électrique dans un tel contexte.

Cependant, ces modèles énergétiques sont principalement utilisés au niveau macro, généralement à l'échelle nationale, mais aussi transnationale. La littérature est plus limitée sur les études prospectives qui comportent le couplage entre le réseau (extra-) national et régional. En ne modélisant pas les contraintes des réseaux de distribution, certains coûts sont sous-estimés, ce qui remet en cause la pertinence de la stratégie de planification nationale.

Ce travail se place dans la suite de celui effectué dans [1], qui utilisait les modèles énergétiques POLES (Prospective Outlook on Long-term Energy Systems) pour la vision macro-économique, couplé avec EUTGRID (European Transmission Grid Investment and Dispatch) pour l'aspect de modélisation technique du réseau de distribution. Le modèle EUTGRID a été remplacé par Backbone [2], un modèle énergétique plus récent qui pallie à certaines limitations de modélisations et d'usage d'EUTGRID.

Dans cet article, sera ainsi explicité dans un premier temps comment les modèles énergétiques adéquats ont été choisis, et dans un second temps comment Backbone permet la

modélisation de systèmes énergétiques divers et en évaluant la précision de ces modèles. Ainsi il nous sera possible de modéliser à terme des systèmes multi-énergies en ayant une portée (extra-) nationale tout en conservant des détails suffisants à la granularité du réseau de distribution.

## 2. ECHELLE DE REPRESENTATION

Devant la diversité grandissante des modèles énergétiques, un travail de revue de littérature et de tri a dû être réalisé, afin de faire émerger les meilleures alternatives pour répondre aux questions de prospectives énergétiques multi-échelles.

Il existe de nombreux modèles énergétiques [3], cependant ils sont loin d'être équivalents. Ci-dessous sont expliqués les principaux critères où il y a une divergence des modèles.

Tout d'abord, les contraintes géographiques sont importantes. En effet, pour modéliser le réseau de distribution il faut une résolution géographique suffisante alors qu'un grand nombre de modèles ne permettent pas d'avoir une précision à l'intérieur de la maille nationale. Néanmoins ces derniers offrent une portée géographique d'étude plus importante, à l'inverse des modèles avec une approche plus locale qui souvent se cantonnent justement à un niveau régional. Cependant, avoir un point de vue multi-échelles complexifie grandement les calculs. C'est pourquoi les travaux à grande échelle sont répandus tout autour du globe, [4] au Brésil, [5] au Japon, [6] en Croatie par exemple, alors qu'au contraire, le multi-échelle se limite à quelques cas spécifiques [1] en France, [7] et [8] en Allemagne. Et encore, ces trois derniers travaux ne considèrent que des réseaux de distribution dans un seul pays alors que leur étude est à portée européenne.

Ensuite, l'horizon temporel est important car il existe des modèles liant présent et futur ainsi que des modèles qui permettent seulement des calculs à un instant donné. Pouvoir lier présent et futur permet d'étudier plus de scénarios, comme des stratégies d'investissement par exemple. Ils sont aussi plus crédibles pour envisager le système énergétique de demain car les choix faits en 2035 auront une influence sur 2050 par exemple. C'est là toute la force des modèles énergétiques de prospectives long termes comme POLES.

Enfin, les types d'énergie modélisés sont aussi très importants. Certains modèles sont par exemple spécialisés sur le réseau électrique et il est donc impossible de prendre en compte le réseau de chaleur ou de tout autre vecteur énergétique. Considérer plusieurs énergies même pour une étude centrée sur le système électrique est pertinent car une grande partie de l'électricité utilisée n'est pas l'énergie finale consommée. D'où l'importance d'avoir une vue multi-énergie car le développement des réseaux et des pompes à chaleur va profondément changer la façon dont l'électricité est consommée en France par exemple. Cela permet aussi de modéliser les centrales de cogénération de façon plus réaliste.

Même s'il existe un grand nombre de modèle énergétiques, très peu permettent d'avoir une vision européenne et à la fois précise, tout en permettant de faire des

études prospectives. EUTGRID permet cela mais ce modèle est limité sur plusieurs aspects. Premièrement, il s'agit d'un développement interne, donc en accès restreint, le code n'a pas pu être complètement validé par la communauté énergie. Deuxièmement, en lien avec le premier point, EUTGRID est de prise en main complexe, et manque d'optimisation pour rendre le code plus efficace et réduire le temps de calcul. Troisièmement, seul le vecteur électricité existe dans EUTGRID et il serait complexe d'ajouter le vecteur chaleur. En souhaitant avoir la possibilité d'allier plusieurs horizons temporels avec une représentativité géographique large mais suffisamment précise, ainsi que la possibilité de considérer des systèmes multi-énergie, le choix a été fait de conserver POLES et de remplacer EUTGRID par Backbone dans un modèle que nous appellerons DISGRID.

POLES permet d'avoir un outil robuste de prospection énergétique à l'horizon 2050 et au-delà, tout en ayant une portée internationale. Backbone quant à lui offre une grande flexibilité pour modéliser des réseaux de distribution et de transport tout en permettant d'étudier les flux multi-énergies. Le couplage entre les outils est fait d'une façon similaire à celle qui a permis de faire communiquer POLES et EUTGRID [9]. D'autre part, Backbone s'appuie sur une communauté d'utilisateurs open-source qui augmente la portée des résultats développés au sein de l'équipe encadrante.

Le modèle se divise donc en deux parties couplées. La première, POLES, utilise des données macro-économiques exogènes comme le PIB ou la population pour évaluer la demande et la production en énergie à la maille nationale. Ces calculs, basés sur des équilibres de marché, se font sur 66 pays ou groupement de pays, à l'échelle mondiale.

Ces données nationales vont ensuite être utilisées par Backbone pour déterminer la répartition de ces énergies sur le territoire. Pour l'énergie électrique, cette répartition se fait via des équations de power flow, avec optimisation du coût de génération.

Une fois que les calculs au niveau des réseaux régionaux sont effectués, les données locales sont utilisées par POLES pour adapter la stratégie des années à venir, puis le bouclage recommence au pas de temps suivant, comme illustré Fig. 1.

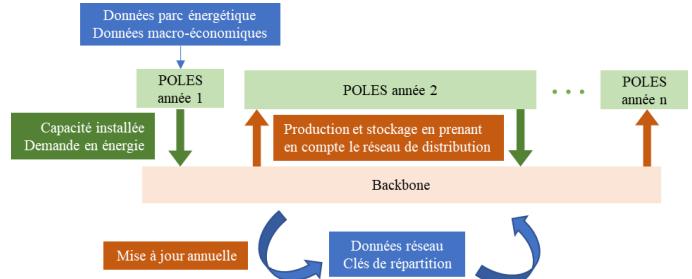


Fig. 1: Schéma de principe du modèle DISGRID

## 3. MODELISATION

Maintenant que le cadre est posé, le modèle créé va être détaillé. Backbone permet de résoudre un power flow optimal, qui est un processus d'optimisation des ressources et des flux

énergétiques sur un réseau. Un objectif à optimiser et des contraintes doivent donc être définies. Le système à optimiser est le réseau européen subdivisé en 87 régions issues de [10], auxquelles sont ajoutés des réseaux de distribution. Les 87 régions étudiées sont affichées Fig. 2.

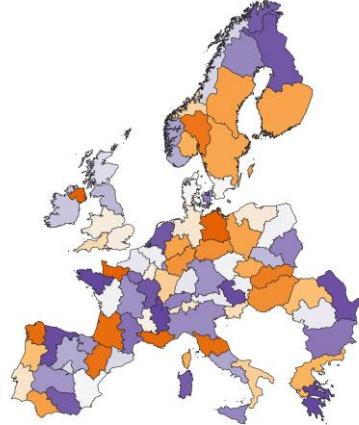


Fig. 2: Régions étudiées par le modèle

### 3.1. Objectif

L'objectif de ce problème est de minimiser le coût d'opération du réseau électrique européen (1).

$$obj = \min \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{x \in X} p_{t,n}^x \times \pi_{t,n}^x \times dt \quad (1)$$

Cela se fait par la minimisation pour tous les pas de temps, tous les nœuds et tous les générateurs, du prix de génération  $\pi_{t,n}^x$  par la puissance produite  $p_{t,n}^x$ .

### 3.2. Contraintes power flow

Il existe différentes équations de power flow, suivant la précision de modélisation voulue [11]. Sans simplification les échanges de puissances active et réactive entre les nœuds sont caractérisés par (2) et (3).

$$f_{t,l}^P = |v_{t,n}| \cdot |v_{t,m}| (g_l \cdot \cos(\theta_{t,n} - \theta_{t,m}) + b_l \cdot \sin(\theta_{t,n} - \theta_{t,m})) - g_l \cdot v_{t,n}^2 \quad (2)$$

$$f_{t,l}^Q = |v_{t,n}| \cdot |v_{t,m}| (g_l \cdot \sin(\theta_{t,n} - \theta_{t,m}) + b_l \cdot \cos(\theta_{t,n} - \theta_{t,m})) + b_l \cdot v_{t,n}^2 \quad (3)$$

Ces équations complètes, dites de power flow AC, expriment les flux de puissances active ( $f_{t,l}^P$ ) et réactive ( $f_{t,l}^Q$ ) entre les nœuds  $n$  et  $m$ , liés par la ligne  $l$ . Ces flux sont déterminés par les tensions ( $v_{t,n}$ ) aux nœuds, l'angle ( $\theta_{t,n}$ ) ainsi que la conductance ( $g_l$ ) et la susceptance ( $b_l$ ) de la ligne.

Cependant, ces équations non linéaires et non convexes rendent le problème long à résoudre et des simplifications sont nécessaires afin d'obtenir un résultat en un temps raisonnable lorsque la taille du problème augmente. En supposant que la différence angulaire ainsi que le carré de la différence de tension entre les nœuds sont faibles, on peut, à partir des équations (2) et (3), en faisant apparaître la résistance ( $r_l$ ) et la réactance ( $x_l$ ) des lignes, obtenir l'équation (4), qui rend le

problème linéaire. Pour cela la tension au carré est considérée comme une variable au lieu de la tension.

$$\begin{aligned} \forall n, m \in N, \forall l \in L(n) \cup L(m), \forall t \\ 2 \times (r_l \times f_{t,l}^P + x_l \times f_{t,l}^Q) = v_{t,n}^2 - v_{t,m}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.3. Contraintes énergétiques

En plus des contraintes dans les lignes, il faut des contraintes pour les nœuds et les unités de production. Des contraintes en puissance réactive existent mais seules les contraintes en lien avec la puissance active seront détaillées ici car les deux types sont très similaires.

$$\sum_{l \in L(n)} f_{t,l}^P + \sum_{x \in X} p_{t,n}^x - \sum_{y \in Y} d_{t,n}^y = 0 \quad (5)$$

$$e_{t,n}^s = e_{t-1,n}^s + (\eta_s \times d_{t,n}^s - p_{t,n}^s / \eta_s) \times dt \quad (6)$$

$$\underline{e}_n^s \leq e_{t,n}^s \leq \overline{e}_n^s \quad (7) \quad -\overline{f}_l^P \leq f_{t,l}^P \leq \overline{f}_l^P \quad (8)$$

$$\underline{v}_n^2 \leq v_{t,n}^2 \leq \overline{v}_n^2 \quad (9) \quad 0 \leq p_{t,n}^x \leq \overline{p}_n^x \quad (10)$$

L'équation (5) établit la participation de la puissance produite ( $p_{t,n}^x$ ) et consommée ( $d_{t,n}^y$ ) aux flux de puissance dans les lignes. Dans (6) l'efficacité ( $\eta_s$ ), la puissance produite et consommée par l'unité de stockage  $s$  sont reliées à l'énergie disponible dans le stockage ( $e_{t,n}^s$ ). Les contraintes suivantes sont les limites haute et basse de respectivement l'énergie dans un moyen de stockage générique (7), du flux de puissance dans les lignes (8), de la tension (9) et de la puissance générée (10).

## 4. VALIDATION DU MODELE

Avant de lancer des simulations prospectives avec Backbone, il faut tout d'abord vérifier non pas sa validité (déjà validé dans [2]) mais la pertinence des hypothèses de modélisation choisies dans le cadre de notre travail. Pour cela, Backbone est comparé à EUTGRID et à la production réelle en France en 2015 (données RTE). Dans Backbone et EUTGRID, tout le réseau européen ainsi que des réseaux de distribution sont modélisés, mais ici ne sont affichés que les résultats pour la France. Il a été choisi de comparer ces trois mix énergétiques sur un jour moyen d'été.

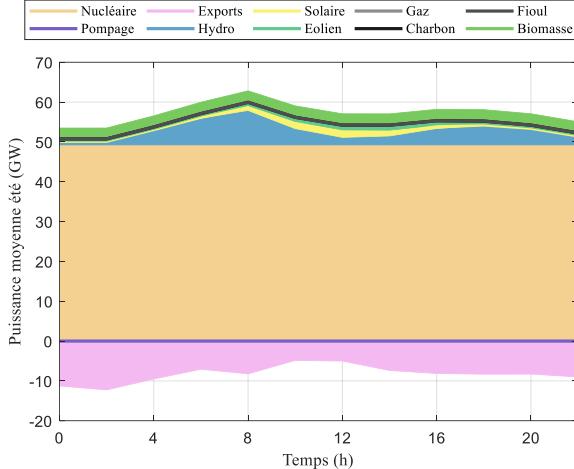


Fig. 3: Mix énergétique moyen en été avec Backbone

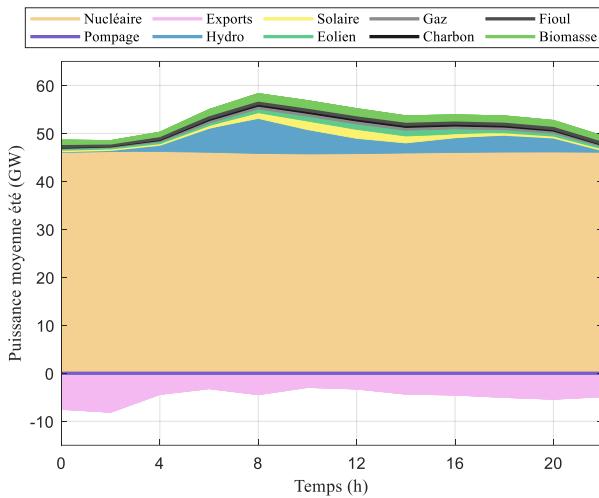


Fig. 4: Mix énergétique moyen en été avec EUTGRID

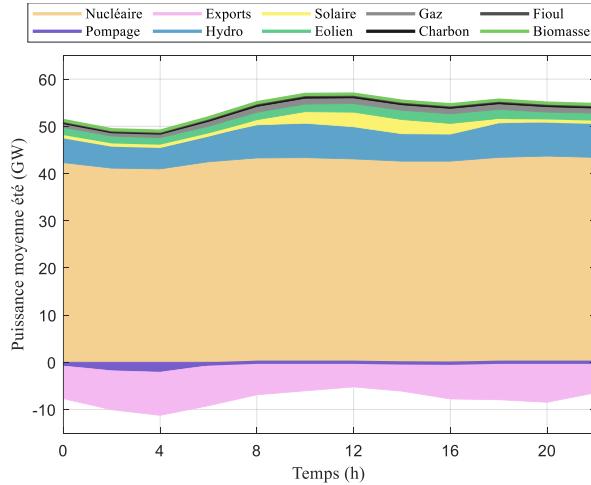


Fig. 5: Mix énergétique moyen en été réel

La comparaison des Fig. 3 et Fig. 4, qui représentent respectivement le mix énergétique obtenu avec Backbone et avec EUTGRID, met en lumière une forte ressemblance des deux profils. Cette similarité s'explique par l'utilisation des

données de POLES par Backbone et EUTGRID qui ne sont pas des données réelles pour 2015 mais des résultats de simulation de POLES (dont les données réelles s'arrêtent en 2013 pour cette étude). Par ailleurs, Backbone ne prend pas encore en compte les réserves, ce qui explique une plus forte utilisation de gaz avec EUTGRID.

Ces profils capturent les grandes lignes du mix énergétique réel (Fig. 5) mais des divergences existent. En effet, la modélisation de l'hydraulique est à améliorer car une grande majorité est contrôlable dans EUTGRID, alors que ce n'est pas le cas en réalité. Par ailleurs, le pompage turbinage n'est presque jamais activé ce qui est probablement dû à un modèle de coût trop élevé. Un deuxième point d'amélioration est la modélisation des énergies renouvelables qui représentent une part plus élevée dans les données RTE. Ainsi, les 6 jours représentatifs utilisés dans Backbone ne semblent pas être suffisants pour capturer l'allure moyenne. Troisièmement, on observe une plus forte production de nucléaire dans les modèles, ce qui ne prend donc pas en compte les maintenances nécessaires pour le parc nucléaire français. Comme le parc est vieillissant, les maintenances vont être plus fréquentes. Ainsi limiter le taux d'utilisation du nucléaire est particulièrement important pour faire des études prospectives. Enfin, la biomasse représente une part plus importante dans les modèles que dans la réalité. Il est cependant logique de constater une faible utilisation de la biomasse en été car celle-ci est principalement utilisée en cogénération et la demande de chaleur est très faible en été. Ce dernier point relève l'importance d'étudier un système multi-énergies et ne pas se restreindre seulement à l'électricité car demande en chaleur et électricité sont étroitement liées, surtout en France. Backbone permet de faire de la modélisation multi-énergies donc est un outil adapté à ces études de prospective énergétique.

## 5. TRAVAIL SUR LE MODELE

Une manière de complexifier le problème pour le rendre plus précis est déjà de considérer une puissance minimale non nulle pour certains générateurs, en remplaçant (10) par (11).

$$\text{Si } x \text{ allumé : } \underline{p}_n^x \leq p_{t,n}^x \leq \overline{p}_n^x, \text{ sinon } p_{t,n}^x = 0 \quad (11)$$

Cependant, cette modélisation introduit des variables binaires ce qui augmente le temps de calcul. De la même manière, plusieurs simplifications du modèle sont testées pour voir lesquelles offrent le meilleur compromis entre précision et temps de calcul. Ainsi, six scénarios de simplification sont testés, sur un système composé seulement des 14 nœuds de la France continentale et de 99 systèmes de production différents, sur 120 pas de temps.

- A : Problème avec variables entières (MILP), réseau complet
- B : Problème sans variables entières (LP), réseau complet
- C : Problème avec variables entières (MILP), sans contraintes réseau (8)
- D : Problème sans variables entières (LP), sans contraintes réseau

- E : Problème avec variables entières (MILP), 1 nœud au lieu de 14
- F : Problème sans variables entières (LP), 1 nœud au lieu de 14

Le temps de calcul, l'objectif (1) et les taux d'erreur sont mesurés pour chaque scénario avec pour référence le scénario A. Deux taux d'erreur sont mesurés, le taux d'erreur sur la contrainte (11), calculé par (12), et sur la contrainte (8), mesuré par (13).

$$\frac{\sum \sum u_t^x}{Card(T).Card(X)} \text{ avec } u_t^x = 1 \text{ si } 0 < p_{t,n}^x \leq \underline{p}_n^x \quad (12)$$

$$\frac{\sum \sum w_{t,l}}{Card(T).Card(L)} \text{ avec } w_{t,l} = 1 \text{ si } |f_{t,l}^P| > \overline{f}_l^P \quad (13)$$

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le Tableau 1.

Tableau 1: Mesure de la précision de scénarios A à F

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<i>Temps calcul (s)</i>	181	6	69	6	130	5
<i>Objectif (M€/an)</i>	4048	4031	4031	4024	3912	3890
(12)	X	1.2 %	X	2.4 %	X	11.3 %
(13)	X	X	15.9 %	15.9 %	Sans réseau	Sans réseau

Le premier résultat frappant est la différence de temps de calcul entre les problèmes avec variables binaires (A, C, E) et ceux sans. Heureusement, passer du scénario de référence A au B utilisé dans le modèle de Backbone n'induit qu'une faible erreur. Cependant, rajouter des simplifications à ce modèle pour passer aux scénarios D ou F n'est pas justifiable car le temps de calcul n'est pas significativement réduit et l'erreur induite est supérieure à 10 %. La modélisation B semble donc offrir le meilleur compromis entre temps de calcul et précision du modèle.

## 6. CONCLUSIONS

Le modèle discuté dans ce papier, nommé DISGRID, par sa modélisation du réseau de distribution, permet d'analyser d'une façon intégrée les stratégies locales et globales et le rôle des réseaux de distribution dans la combinaison des solutions de flexibilité à la maille (extra-) nationale. Ce modèle est actuellement à un niveau de précision équivalent à EUTGRID (un modèle développé dans de précédents travaux) mais permet déjà d'inclure plus de réseaux de distribution et accueillera prochainement un réseau multi-énergie.

Les pistes d'amélioration du modèle ont été mises en avant pour se rapprocher du comportement réel. Le modèle ayant un fonctionnement assez classique et un développement open-source, ces pistes d'améliorations seront utiles pour tous ceux

développant des modèles énergétiques. Par ailleurs, la pertinence de certaines contraintes a été testée, pour obtenir un modèle suffisamment précis tout en conservant un temps de calcul raisonnable.

## 7. REFERENCES

- [1] S. Allard, V. Debusschere, S. Mima, T. T. Quoc, N. Hadjsaid, et P. Criqui, « Considering distribution grids and local flexibilities in the prospective development of the European power system by 2050 », *Applied Energy*, vol. 270, p. 114958, juill. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114958.
- [2] N. Helistö *et al.*, « Backbone—An Adaptable Energy Systems Modelling Framework », *Energies*, vol. 12, n° 17, p. 3388, sept. 2019, doi: 10.3390/en12173388.
- [3] M. Chang *et al.*, « Trends in tools and approaches for modelling the energy transition », *Applied Energy*, vol. 290, p. 116731, mai 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116731.
- [4] G. G. Dranka, P. Ferreira, et A. I. F. Vaz, « Integrating supply and demand-side management in renewable-based energy systems », *Energy*, vol. 232, p. 120978, oct. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120978.
- [5] A. Ozawa, T. Tsani, et Y. Kudoh, « Japan's pathways to achieve carbon neutrality by 2050 – Scenario analysis using an energy modeling methodology », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112943, nov. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112943.
- [6] L. Herc, « Energy system transitions pathways with the new H2RES model: A comparison with existing planning tool », *Advances in Electrical Engineering*, p. 16, 2021.
- [7] C. Müller *et al.*, « Modeling framework for planning and operation of multi-modal energy systems in the case of Germany », *Applied Energy*, vol. 250, p. 1132-1146, sept. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.05.094.
- [8] B. Reveron Baecker et S. Candas, « Co-optimizing transmission and active distribution grids to assess demand-side flexibilities of a carbon-neutral German energy system », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 163, p. 112422, juill. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112422.
- [9] S. Allard, S. Mima, V. Debusschere, T. T. Quoc, P. Criqui, et N. Hadjsaid, « European transmission grid expansion as a flexibility option in a scenario of large scale variable renewable energies integration », *Energy Economics*, vol. 87, p. 104733, mars 2020, doi: 10.1016/j.eneco.2020.104733.
- [10] Anderski, T., Surmann, Y., Stemmer, S., Grisey, N., Momot, E., Leger, A.-C., Bretaoui, B., Van et Roy, P., « European cluster model of the pan-European transmission grid ». 2014.
- [11] M. Falvo, S. Panella, M. Caprabianca, et F. Quaglia, « A Review on Unit Commitment Algorithms for the Italian Electricity Market », *Energies*, vol. 15, n° 1, p. 18, déc. 2021, doi: 10.3390/en15010018.