

# Planification optimale de pompes à chaleur avec prise en compte des contraintes du réseau basse tension

Célia MASTERNAK<sup>1,2</sup>, Vincent REINBOLD<sup>1,2</sup>, Simon MEUNIER<sup>1,2</sup>, Dirk SAELENS<sup>3,4</sup>, Claude MARCHAND<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, GeePs, 91192 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup> Sorbonne Université, CNRS, GeePs, 75252 Paris, France

<sup>3</sup> KU Leuven, Department of Civil Engineering, Building Physics Section, Kasteelpark Arenberg 40, Heverlee 3001, Belgium

<sup>4</sup> EnergyVille, Thor Park 8310, Genk 3600, Belgium

**RESUME** - Les pompes à chaleur, grâce à leur efficacité élevée, ont un important potentiel de décarbonation du chauffage résidentiel. Cet article présente une méthodologie pour dimensionner et gérer de façon optimale des pompes à chaleur connectées au réseau basse tension. Nous dimensionnons notamment les pompes à chaleur tout en prenant en compte les contraintes du réseau triphasé. De plus, nous considérons des logements avec des caractéristiques différentes. La méthode est appliquée à un quartier rural Belge, mettant en évidence des résultats intéressants en termes de coûts et d'émissions de CO<sub>2</sub>.

**Mots-clés**—Pompe à chaleur, réseau basse tension, gestion d'énergie, dimensionnement, optimisation

## 1. INTRODUCTION

En Europe, le chauffage des pièces et de l'eau chaude sanitaire représente 14% des émissions de CO<sub>2</sub> [1][2]. Les pompes à chaleur sont une solution intéressante pour décarboner le secteur du chauffage puisqu'elles ont une efficacité d'environ 300% et fonctionnent à l'électricité, un vecteur énergétique peu carboné et/ou décarbonable. Cependant, l'implémentation à large échelle des pompes à chaleur constitue un défi pour les gestionnaires du réseau électrique [3].

Afin de faciliter l'intégration des pompes à chaleur et de maximiser leurs bénéfices tels que la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, des problèmes d'optimisation sont formulés et résolus. Par exemple, Morvaj et al. [4] ont optimisé la gestion et le dimensionnement de systèmes énergétiques distribués (pompe à chaleur, stockage thermique et électrique) pour un quartier. Razmara et al. [5] ont proposé une méthodologie pour minimiser les coûts de gestion de l'énergie pour des logements équipés d'une pompe à chaleur. Cependant, ces deux articles ont considéré un réseau équilibré, alors que l'intégration des pompes à chaleur peut augmenter le déséquilibre du réseau [3][6]. Rao et al. [7] ont proposé une méthodologie afin de gérer de manière optimale des logements équipés d'une pompe à chaleur en prenant en compte les contraintes du réseau basse tension triphasé déséquilibré. Néanmoins, les auteurs n'ont considéré que quatre types de logement et n'ont pas dimensionné les pompes à chaleur alors que les contraintes du réseau peuvent influencer le dimensionnement.

Dans cet article, nous proposons une méthodologie pour déterminer la planification (gestion et dimensionnement) optimale de pompes à chaleur (PAC) en prenant en compte les contraintes du réseau basse tension triphasé déséquilibré. De plus, nous considérons la variabilité du parc résidentiel.

Dans la Section 2, nous présentons le système considéré. La Section 3 introduit les différents modèles développés et

implémentés. Dans la Section 4, nous présentons le problème d'optimisation. La Section 5 décrit le cas d'étude. Les résultats sont présentés dans la Section 6. Enfin, des conclusions sont formulées dans la Section 7.

## 2. SYSTEME CONSIDERE ET CADRE DE L'ETUDE

Nous considérons un départ du réseau basse tension. Les logements sont connectés en monophasé avec alternance de phase (le premier logement est connecté sur la phase *a*, le deuxième sur la *b*, etc.) [8]. Chaque logement possède son propre niveau d'isolation thermique et est équipé d'une PAC air-eau modulaire ou d'une chaudière à gaz pour le chauffage des pièces et de l'eau chaude sanitaire. Le système est illustré sur la figure Fig. 1. Les logements requièrent des consignes en température et en eau chaude. Pour chaque logement, nous avons également pris en compte la consommation électrique de base (ex : pour les appareils électroménagers et l'éclairage).

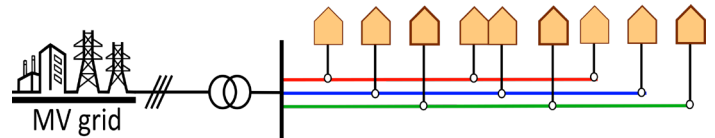


Fig. 1. Schéma du système considéré

Nous formulons un problème d'optimisation linéaire en nombres entiers car cela garantit d'atteindre l'optimum global et réduit les temps de calcul par rapport à des problèmes non linéaires [9]. Les modèles présentés ci-dessous sont donc linéaires en nombres entiers.

## 3. MODÉLISATION

### 3.1. Logement

Un logement est modélisé par des résistances (*R*) et des capacités (*C*) thermiques comme illustré sur la Fig. 2. Il est divisé en deux zones thermiques : la zone jour (pièces à vivre) et la zone nuit (chambres). Ce modèle a été développé par Reynders [10]. La température opérative (température ressentie par les occupants) est notée  $T_{op,D}$  dans la zone jour et  $T_{op,N}$  dans la zone nuit. La température opérative dans la zone jour est calculée de la manière suivante [11]:

$$T_{op,D} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{T_{wiD} + T_{wD} + T_{fDN} + T_{fD}}{4} + T_{iD} \right) \quad (1)$$

où  $T_{wiD}$ ,  $T_{wD}$ ,  $T_{fDN}$  et  $T_{fD}$  sont respectivement les températures des parois intérieures, extérieures, de la paroi séparant la zone jour et la zone nuit et du sol.  $T_{iD}$  est la température de l'air dans la zone jour. La température opérative dans la zone nuit est

calculée de manière analogue.

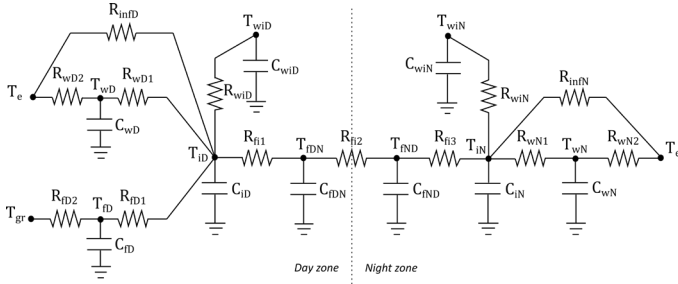


Fig. 2. Modèle RC du logement, adapté de [10]

La température extérieure est notée  $T_e$ . Les températures de consigne sont notées  $T_{set,D}$  et  $T_{set,N}$  dans la zone jour et la zone nuit respectivement.

### 3.2. Pompe à chaleur

La PAC est modélisée par un coefficient de performance constant égal à 3 pour le chauffage des pièces  $COP_{SH}$  et égal à 2 pour l'eau chaude sanitaire  $COP_{HW}$  [12]. La PAC est bi-zone c'est-à-dire qu'elle peut chauffer deux zones à des températures différentes. La consommation électrique de la PAC,  $P_{HP}$ , est calculée de la manière suivante :

$$P_{HP}(t) = P_{HP,D}(t) + P_{HP,N}(t) + P_{HP,HW}(t) \quad (2)$$

avec  $P_{HP,D}$ ,  $P_{HP,N}$  et  $P_{HP,HW}$  les puissances électriques consommées par la PAC pour chauffer la zone jour, la zone nuit et le ballon d'eau chaude. Ces puissances sont calculées de la manière suivante :

$$P_{HP,D}(t) = \frac{Q_D(t)}{COP_{SH}} \quad (3)$$

$$P_{HP,N}(t) = \frac{Q_N(t)}{COP_{SH}} \quad (4)$$

$$P_{HP,HW}(t) = \frac{Q_{HW}(t)}{COP_{HW}} \quad (5)$$

avec  $Q_D$ ,  $Q_N$  et  $Q_{HW}$  la chaleur produite par la PAC pour la zone jour, la zone nuit et l'eau chaude sanitaire. La PAC est couplée à un chauffage au sol pour distribuer la chaleur dans les pièces. De plus, elle est équipée d'un chauffage résistif d'appoint afin de l'assister en cas de températures extérieures extrêmes [13]. Le chauffage résistif d'appoint a une puissance nominale de 3 kW [14]. On note  $P_{RH,D}$ ,  $P_{RH,N}$  et  $P_{RH,HW}$  la consommation électrique du chauffage résistif d'appoint pour chauffer la zone jour, la zone nuit et le ballon d'eau chaude respectivement.

### 3.3. Chaudière à gaz

La chaudière à gaz est considérée de dimensionnement fixe (30 kW) et avec une efficacité de 95% [15].

### 3.4. Réseau basse tension

Nous modélisons le départ du réseau basse tension triphasé déséquilibré grâce aux équations linéarisées des flux de puissances [16]. Elles donnent l'amplitude au carré de la tension pour chaque nœud  $i$  et sur chaque phase  $\phi$  :  $Y_i^\phi$ .

### 3.5. Economique

Nous exprimons les coûts sur cycle de vie par logement  $\overline{LCC}$  de la manière suivante [17] :

$$\overline{LCC} = \frac{1}{n_d} \sum_{d=1}^{n_d} (C_{inv}(d) + C_{op}(d)) \quad (6)$$

avec  $C_{inv}(d)$  les coûts d'investissement (pour la PAC ou la chaudière à gaz) pour le logement  $d$ ,  $C_{op}(d)$  les coûts actualisés d'opération pour le logement  $d$  et  $n_d$  le nombre de logements sur le départ. Pour la PAC, les coûts d'investissement sont une fonction linéaire de la capacité thermique nominale. Pour la chaudière à gaz, les coûts d'investissement sont fixes car la puissance nominale est fixée. Les coûts d'opération actualisés sont calculés de la manière suivante :

$$C_{op}(d) = \sum_{y=1}^L \sum_{t \in T} \frac{\frac{n_h}{T} \cdot c_{SH}(t) + \frac{365}{T} \cdot (c_{HW}(t) + c_{bl}(t))}{(1 + \delta)^y} \quad (7)$$

avec  $T$  la longueur de l'horizon temporel sur lequel est résolu le problème d'optimisation,  $L$  la durée utilisée pour le cycle de vie,  $n_h$  le nombre de jours dans la saison de chauffe, et  $\delta$  le taux d'actualisation.  $c_{SH}$ ,  $c_{HW}$  et  $c_{bl}$  sont les coûts instantanés pour le chauffage des pièces, de l'eau chaude et pour satisfaire la consommation électrique de base. Comme mis en évidence par l'équation (3), les coûts sur cycle de vie par bâtiment  $\overline{LCC}$  sont calculés en considérant les coûts de tous les logements du départ puis en divisant par le nombre de logements sur le départ. Cela permet d'obtenir des résultats comparables entre deux départs même si le nombre de logements est différent.

### 3.6. Environnemental

Les émissions de  $CO_2$  sur cycle de vie par logement  $\overline{LCE}$  sont calculées de la manière suivante :

$$\overline{LCE} = \frac{1}{n_d} \sum_{d=1}^{n_d} (E_{inv}(d) + E_{op}(d)) \quad (8)$$

avec  $E_{inv}(d)$  les émissions de  $CO_2$  intrinsèques (liées à la production, au transport, à la maintenance et à la fin de vie du système de chauffage) pour le logement  $d$  et  $E_{op}(d)$  les émissions lors de la phase d'opération du logement  $d$ , calculées en considérant l'évolution de la consommation énergétique du logement et la nature du système de chauffage. Les émissions intrinsèques ont été calculées en effectuant une analyse du cycle de vie.

## 4. OPTIMISATION

### 4.1. Fonction objectif et degrés de liberté

Nous cherchons à minimiser les coûts sur cycle de vie  $\overline{LCC}$ . Les degrés de liberté de dimensionnement sont la capacité thermique nominale de la PAC (pour chaque logement). Les degrés de liberté de gestion sont la consommation électrique de la PAC et du chauffage d'appoint résistif (pour la zone jour, la zone nuit et pour le chauffage du ballon d'eau chaude) à chaque pas de temps et pour chaque logement. Pour un logement, on a donc 6 degrés de liberté liés à l'opération par pas de temps. Cela mène à un nombre élevé de degrés de liberté. Par exemple, si on

considère 15 logements sur un horizon temporel de 8 jours avec un pas de temps de 15 minutes (ce qui donne 4 pas de temps par 24 heures), cela donne  $8 \times 24 \times 4 \times 6 \times 15 + 15 = 69\,135$  degrés de liberté.

#### 4.2. Contraintes

En ce qui concerne les contraintes, nous avons les contraintes associées au réseau électrique (ex : écarts de tensions et déséquilibres maximaux, limites en courant). Les contraintes usuelles et leur linéarisation sont détaillées dans le Tableau 1.  $V_i^\phi$  est l'amplitude de la tension au nœud  $i$  et sur la phase  $\phi$ .  $V_{nom}$  est la tension nominale.  $P_{ij}^\phi$  et  $Q_{ij}^\phi$  sont les puissances actives et réactives entre les nœuds  $i$  et  $j$  sur la phase  $\phi$ .  $S_{nom}$  est la puissance apparente nominale du transformateur.  $I_{ij}^\phi$  est le courant circulant entre les nœuds  $i$  et  $j$  sur la phase  $\phi$ .  $Y_i^{avg}$  est l'amplitude au carré de la tension moyennée sur les trois phases au niveau du nœud  $i$ .

Tableau 1: Contraintes du réseau basse tension

Contraintes usuelles [3]	Contraintes linéarisées
Amplitude de la tension	
$0,9 \leq \frac{V_i^\phi}{V_{nom}} \leq 1,1$	$(0,9 \cdot V_{nom})^2 \leq Y_i^\phi(t) \leq (1,1 \cdot V_{nom})^2$
Déséquilibre de la tension	
$VU = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \leq 2\%$ avec $\beta = \frac{(V_{12})^4 + (V_{23})^4 + (V_{31})^4}{((V_{12})^2 + (V_{23})^2 + (V_{31})^2)^2}$	$\frac{ Y_i^\phi(t) - Y_i^{avg}(t) }{Y_i^{avg}(t)} \leq 10\% [18]$ La limite de 10% a été déterminée avec OpenDSS.
Transformateur*	
$\frac{S_{01}}{S_{nom}} \leq 1$	$(P_{10}^a + P_{10}^b + P_{10}^c)^2 + (Q_{10}^a + Q_{10}^b + Q_{10}^c)^2 \leq S_{nom}^2 [18]$ Linéarisation : $-S_{nom} \leq P_{10}^a + P_{10}^b + P_{10}^c \leq S_{nom}$ $-S_{nom} \leq Q_{10}^a + Q_{10}^b + Q_{10}^c \leq S_{nom}$ $-\sqrt{2} \cdot S_{nom} \leq (P_{10}^a + P_{10}^b + P_{10}^c) + (Q_{10}^a + Q_{10}^b + Q_{10}^c) \leq \sqrt{2} \cdot S_{nom}$ $-\sqrt{2} \cdot S_{nom} \leq (P_{10}^a + P_{10}^b + P_{10}^c) - (Q_{10}^a + Q_{10}^b + Q_{10}^c) \leq \sqrt{2} \cdot S_{nom}$
Ligne	
$I_{ij}^\phi \leq I_{ij}^{max}$	$(P_{ij}^\phi)^2 + (Q_{ij}^\phi)^2 \leq (S_{ij}^{max})^2 [18]$ Linéarisation : $-S_{ij}^{max} \leq P_{ij}^\phi \leq S_{ij}^{max}$ $-S_{ij}^{max} \leq Q_{ij}^\phi \leq S_{ij}^{max}$ $-\sqrt{2} \cdot S_{ij}^{max} \leq P_{ij}^\phi + Q_{ij}^\phi \leq \sqrt{2} \cdot S_{ij}^{max}$ $-\sqrt{2} \cdot S_{ij}^{max} \leq P_{ij}^\phi - Q_{ij}^\phi \leq \sqrt{2} \cdot S_{ij}^{max}$

Note : \* La branche 0 – 1 correspond au transformateur.

En outre, une contrainte de confort thermique est considérée : la température opérative de doit pas être supérieure à la température de consigne de 2,5°C ou inférieure de 1°C. De la même manière, la température du ballon d'eau chaude doit rester comprise entre 50°C et 65°C. Pour la PAC, sont également prises en compte des contraintes de fonctionnement. Par exemple, la modulation (ratio de la puissance thermique produite sur la puissance thermique maximale que peut produire

la PAC) minimale est égale à 25% [19]. De plus, la PAC ne peut pas être utilisée à la fois pour le chauffage du ballon d'eau chaude et pour le chauffage des pièces. Ces contraintes nécessitent l'introduction de grandeurs binaires, ce qui augmente la complexité du problème d'optimisation.

#### 5. CAS D'ÉTUDE

Nous considérons un départ rural situé en Belgique et constitué de 15 logements. Les caractéristiques du réseau (puissance nominale du transformateur, section des câbles, ...) sont celles d'un réseau rural Belge typique [3]. Les propriétés thermiques (U-values) et physiques (surfaces) des logements proviennent de la base de données TABULA [20]. Les logements ont été construits après 1971 ou ont effectué des rénovations [10]. Les données d'entrée pour chaque logement (demande en eau chaude, températures de consigne, gain de chaleur interne et consommation électrique de base) ont été déterminées grâce au package Python STROBE [21]. La température extérieure a été mesurée à Uccle, en Belgique. Les tarifs de l'électricité et du gaz naturel sont ceux de 2022 pour la Belgique [22]. Pour le tarif de l'électricité, nous avons considéré que les logements étaient équipés d'un contrat heure pleine / heure creuse. Le facteur d'émission de l'électricité est calculé à partir des données de [23]. Les calculs sont effectués pour une durée  $L$  de 20 ans [4].

Nous considérons deux scénarios : tous les logements sont équipés d'une PAC (taux d'intégration des PAC de 100%) ou tous les logements sont équipés d'une chaudière à gaz (taux d'intégration des PAC de 0%).

Le problème d'optimisation est résolu pour un horizon temporel de 8 jours : premier jour de chaque mois de la saison de chauffe (de septembre à avril pour la localisation considérée). En effet, résoudre le problème d'optimisation sur l'intégralité de la saison de chauffe conduirait à des temps de calcul très importants (supérieurs à plusieurs mois). Les jours sont considérés indépendants les uns des autres en terme de dynamique. Cela permet d'éviter que le premier jour d'un mois ait de l'influence sur le mois d'après.

Le problème d'optimisation a été formulé avec Pyomo (package Python). Il a été résolu avec Gurobi qui utilise l'algorithme « branch and bound » pour résoudre des problèmes linéaires en nombre entier.

#### 6. RESULTATS

##### 6.1. Comparaison des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>

Les coûts sur cycle de vie  $\overline{LCC}$  et les émissions de CO<sub>2</sub> sur cycle de vie  $\overline{LCE}$  par logement sont résumés dans le Tableau 2. Ces valeurs correspondent aux coûts et émissions pour satisfaire la demande énergétique en termes de chauffage et de consommation électrique de base sur 20 ans. On remarque qu'un taux d'intégration des PAC de 100% conduit à une division des coûts par un facteur 1,2 et une division des émissions de CO<sub>2</sub> par un facteur 3,9 par rapport au cas où tous les logements sont équipés d'une chaudière à gaz (i.e. 0% de PAC).

Tableau 2: Comparaison des coûts économiques et environnementaux

	100% de PAC	0% de PAC
$\overline{LCC}$	58,4 k€	72,7 k€
$\overline{LCE}$	20,3 tCO <sub>2</sub> eq	78,3 tCO <sub>2</sub> eq

## 6.2. Dimensionnement

Dans le Tableau 3, nous avons comparé, pour chacun des logements, les capacités thermiques nominales (en kW) des PAC obtenues grâce à la méthode de dimensionnement classique et celles obtenues en résolvant le problème d'optimisation. La méthode de dimensionnement classique utilise le DHL (« design heat load ») du logement [14] calculé selon la norme EN 12831. Cette méthode de dimensionnement statue que la PAC doit satisfaire les pertes thermiques du logement (par transmission et ventilation) lorsque la température extérieure est égale à la température de base (température la plus basse relevée pendant au moins 5 jours de l'année) [14]. Nous remarquons dans le Tableau 3 que les dimensionnements obtenus avec la méthode classique sont de plus grande taille que ceux obtenus en résolvant le problème d'optimisation.

Tableau 3: Comparaison des capacités thermiques nominales

	Classique (kW)	Optimisation (kW)
Logement 1	26,3	15,8
Logement 2	15,2	5,6
Logement 3	15,6	4,3
Logement 4	16,9	4
Logement 5	17,9	4,5
Logement 6	15,2	4
Logement 7	15,2	5
Logement 8	13,6	4,1
Logement 9	10,9	5,9
Logement 10	11,4	4
Logement 11	26,3	16
Logement 12	15,2	4
Logement 13	15,6	4,1
Logement 14	16,9	4,1
Logement 15	17,9	4,2

## 6.3. Gestion d'énergie

Dans cette sous-section, les courbes sont tracées pour un logement d'isolation moyenne  $U_{avg} = 0,69 \text{ W/m}^2\text{K}$  (logement 8) équipé d'une PAC, pour la journée du 1<sup>er</sup> novembre. Le foyer comporte trois personnes : deux personnes travaillant à plein temps et une personne scolarisée. Sur la Fig. 3, nous avons tracé la consommation électrique de la PAC et du chauffage résistif d'appoint. Dans cette situation, le chauffage d'appoint n'a pas consommé d'électricité, ce qui signifie que la PAC était suffisante pour satisfaire le confort thermique des occupants pour cette journée.

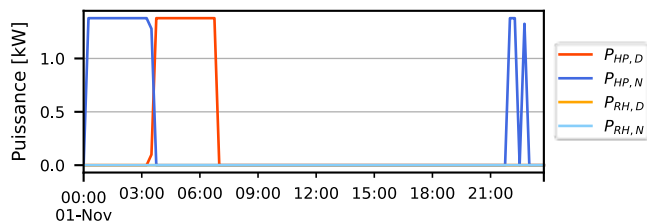


Fig. 3. Consommation électrique de la PAC et du chauffage résistif d'appoint pour le chauffage des pièces des zones jour ( $P_{HP,D}$  et  $P_{RH,D}$ ) et nuit ( $P_{HP,N}$  et  $P_{RH,N}$ )

Sur la figure Fig. 4, nous observons l'évolution de la température extérieure, des températures opératives et des températures de consigne. Il n'y a aucune température de consigne lorsque les occupants sont absents du logement (par exemple à 15:00 sur la figure ci-dessous).

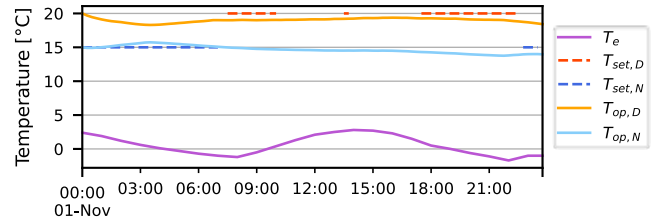


Fig. 4. Température extérieure  $T_e$ , de consigne (dans les zones jour  $T_{set,D}$  et nuit  $T_{set,N}$ ) et opératives (dans les zones jour  $T_{op,D}$  et jour  $T_{op,N}$ )

On observe que la PAC préchauffe la zone jour (entre 3:00 et 7:00) alors que les occupants ne sont présents dans la zone jour qu'après 7:00. La PAC fonctionne donc de préférence quand le prix de l'électricité est faible. De plus, la zone jour n'est chauffée que le matin.

La Fig. 5 présente l'évolution de la puissance électrique consommée par la PAC et le chauffage résistif d'appoint pour chauffer le ballon d'eau chaude. Ici, le chauffage d'appoint n'est pas non plus utilisé pour cette journée.

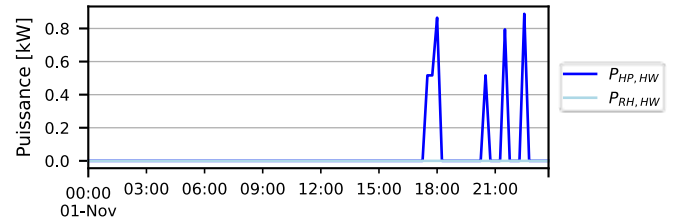


Fig. 5. Consommation électrique de la PAC et du chauffage résistif d'appoint pour le chauffage du ballon d'eau chaude ( $P_{HP,HW}$  et  $P_{RH,HW}$  respectivement)

Sur la figure Fig. 6, nous avons tracé l'évolution de la température du ballon d'eau chaude. On observe une demande importante en début de soirée. Dans cette situation, la PAC chauffe le ballon lorsque la demande en eau est importante afin que la température de l'eau dans le ballon ne devienne pas inférieure à 50°C.

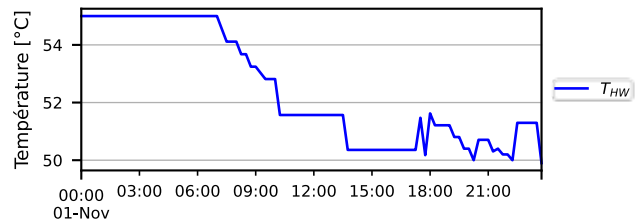


Fig. 6. Température du ballon d'eau chaude  $T_{HW}$

## 6.4. Réseau

Sur la Fig. 7, nous observons l'amplitude de la tension au niveau du nœud le plus éloigné du transformateur pour le 1<sup>er</sup> novembre lorsque tous les logements sont équipés d'une PAC. La tension sur chacune des phases respecte bien les contraintes du réseau en termes d'amplitude.

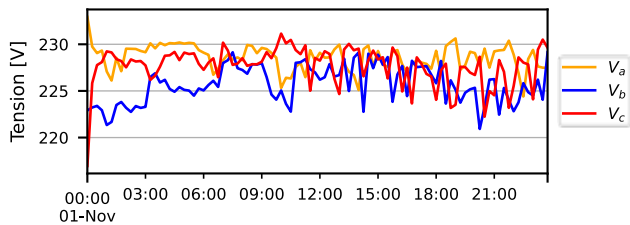


Fig. 7. Tensions pour les phases a, b et c au niveau du dernier nœud

Les puissances obtenues lors de l'optimisation ont été mises en entrée d'OpenDSS (simulateur de réseau) afin de calculer le déséquilibre entre les phases selon la formule non linéaire (voir Tableau 1). La Fig. 8 présente le déséquilibre au niveau du nœud le plus éloigné du transformateur pour le 1<sup>er</sup> novembre. Nous remarquons que le déséquilibre reste bien inférieur à 2%.

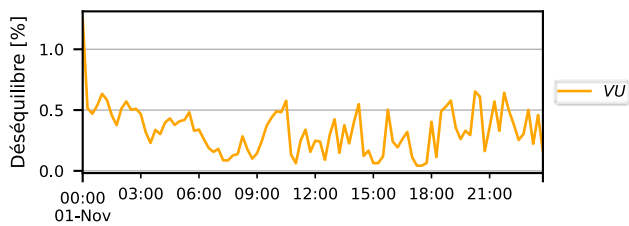


Fig. 8. Déséquilibre entre les phases au niveau du dernier nœud

La tension minimale et le déséquilibre entre phases maximal sur l'ensemble des nœuds du départ pour tout l'horizon temporel considéré sont résumés dans le Tableau 4. Les indicateurs sont donnés pour 100% de PAC et pour 0% de PAC. Nous rappelons que, dans ce dernier cas, la seule consommation électrique du logement est la consommation électrique de base (qui est également prise en compte dans le cas 100% de PAC).

Tableau 4: Indicateurs de stabilité du réseau

	Tension minimale	Déséquilibre maximal
100% de PAC	213 V	1,4%
0% de PAC	224 V	0,35%

## 7. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une méthodologie pour dimensionner et gérer de manière optimale des pompes à chaleur en prenant en compte les contraintes du réseau basse tension triphasé déséquilibré. Nous avons résolu le problème d'optimisation pour un cas d'étude : un départ basse tension situé dans une zone rurale en Belgique. La résolution du problème d'optimisation nous a permis d'équiper 100% des logements d'une pompe à chaleur tout en garantissant le confort thermique des occupants et la stabilité du réseau, en divisant les coûts par 1,2 et en divisant les émissions de CO<sub>2</sub> par 3,9 par rapport à la situation où les logements sont équipés d'une chaudière à gaz. La méthodologie proposée dans cet article peut être utile pour des décideurs publics et des installateurs de pompes à chaleur afin de mieux dimensionner et gérer ces dernières de manière à réduire les coûts et l'impact sur le réseau électrique.

## 8. REFERENCES

- [1] H. Ritchie, M. Roser, et P. Rosado, « CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions, Our World in Data », 2020. URL : <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- [2] European Commission, "Heating and cooling", 2020, URL: [https://ec.europa.eu/energy/topics/energyefficiency/heating-and-cooling\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energyefficiency/heating-and-cooling_en)
- [3] S. Meunier, C. Protopapadaki, R. Baetens, et D. Saelens, « Impact of residential low-carbon technologies on low-voltage grid reinforcements », *Appl. Energy*, vol. 297, p. 117057, sept. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117057.
- [4] B. Morvaj, R. Evins, et J. Carmeliet, « Decarbonizing the electricity grid: The impact on urban energy systems, distribution grids and district heating potential », *Appl. Energy*, vol. 191, p. 125-140, avr. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.058.
- [5] M. Razmara, G. R. Bharati, M. Shahbakhti, S. Paudyal, et R. D. Robinett, « Bilevel Optimization Framework for Smart Building-to-Grid Systems », *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, n° 2, p. 582-593, mars 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2557334.
- [6] F. Gonzalez, S. Meunier, C. Protopapadaki, Y. Perez, D. Saelens, M. Petit, "Impact of distributed energy resources and electric vehicle smart charging on low voltage grid stability", presented at the 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2021), p. 1-6, Sept. 2021.
- [7] B. V. Rao, M. Stefan, R. Schwalbe, R. Karl, F. Kupzog, et M. Kozek, « Stratified Control Applied to a Three-Phase Unbalanced Low Voltage Distribution Grid in a Local Peer-to-Peer Energy Community », *Energies*, vol. 14, n° 11 : 3290, juin 2021, doi: 10.3390/en14113290.
- [8] R. Guo, S. Meunier, C. Protopapadaki, et D. Saelens, « A review of European low-voltage distribution networks », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 173 : 113056, mars 2023, doi: 10.1016/j.rser.2022.113056.
- [9] D. Bertsekas, MIT Course, "Nonlinear programming", 2005, URL: <http://web.mit.edu/6.252/www/>
- [10] G. Reynders, "Quantifying the impact of building design on the potential of structural storage for active demand response in residential buildings", PhD thesis, Belgium: KU Leuven, 2015.
- [11] « Operative temperature », URL: [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Operative\\_temperature](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Operative_temperature)
- [12] C. Verhelst, F. Logist, J. Van Impe, et L. Helsen, « Study of the optimal control problem formulation for modulating air-to-water heat pumps connected to a residential floor heating system », *Energy Build.*, vol. 45, p. 43-53, févr. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.015.
- [13] H. Krütfeldt, C. Vering, P. Mehrfeld, et D. Müller, « MILP design optimization of heat pump systems in German residential buildings », *Energy Build.*, vol. 249 : 111204, oct. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111204.
- [14] C. Protopapadaki et D. Saelens, « Heat pump and PV impact on residential low-voltage distribution grids as a function of building and district properties », *Appl. Energy*, vol. 192, p. 268-281, avr. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.11.103.
- [15] « Efficiency gas boiler », URL: <https://www.energy.gov.au/sites/default/files/hvac-factsheet-boiler-efficiency.pdf>
- [16] E. Dall'Anese, H. Zhu, et G. B. Giannakis, « Distributed Optimal Power Flow for Smart Microgrids », *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, n° 3, p. 1464-1475, sept. 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2248175.
- [17] R. Renaldi, A. Kiprakis, et D. Friedrich, « An optimisation framework for thermal energy storage integration in a residential heat pump heating system », *Appl. Energy*, vol. 186, p. 520-529, janv. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.067.
- [18] H. F. Zhai, M. Yang, B. Chen, et N. Kang, « Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks », *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 99, p. 1-10, juill. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.12.027.
- [19] R. De Coninck, R. Baetens, D. Saelens, A. Woyte, et L. Helsen, « Rule-based demand-side management of domestic hot water production with heat pumps in zero energy neighbourhoods », *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 7, n° 4, p. 271-288, juill. 2014, doi: 10.1080/19401493.2013.801518.
- [20] W. Cyx, N. Renders, V. H. M., and S. Verbeke, "IEE TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment", Tech. Rep. Aug. 2011.
- [21] R. Baetens et D. Saelens, « Modelling uncertainty in district energy simulations by stochastic residential occupant behaviour », *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 9, n° 4, p. 431-447, juill. 2016, doi: 10.1080/19401493.2015.1070203.
- [22] « Electricity and natural gas prices - Belgium », 2022. URL: <https://callmepower.be/fr/energie/fournisseurs/engie-electrabel/tarifs>
- [23] ENTSOE, « Open Data ». URL: <https://transparency.entsoe.eu>