

Modélisation des défauts d'usage d'une pompe à chaleur sous forme de réseau de Pétri.

Toan VO MINH^{*1,2}, Christophe BARRAS², Charles PELE², Emmanuel BOZONNET¹

¹ LaSIE UMR CNRS 7356, Université de la Rochelle
17042 la Rochelle, Cedex 1 – France

² Centre scientifique et technique du bâtiment
77420 Champs-sur-Marne, Cedex 2 – France

*toan.vominh@cstb.fr

RESUME. Les pompes à chaleur (PAC) sont fréquemment utilisées dans le conditionnement des ambiances des bâtiments résidentiels en France. Cependant, leurs performances réelles sont différentes de leurs performances théoriques. Plusieurs facteurs vont impacter leurs performances. Dans cet article, nous analyserons en particulier les défauts d'usage. Afin d'intégrer dans les outils de calculs l'ensemble des défauts et leurs interdépendances, le système est modélisé avec son fonctionnement réel sous la forme d'un réseau de Pétri (RdP). Grâce à cet outil, il est possible d'étudier l'influence des défauts sur le fonctionnement d'un système.

MOTS-CLÉFS. Modélisation des défauts, réseau de Pétri, pompe à chaleur.

ABSTRACT. Heat pumps (HP) are frequently used in the residential buildings in France. However, their actual performance is different from their theoretical ones. Several factors will impact their performance. In this article, we will analyze the operational faults. In order to integrate all the faults and their interdependencies into the calculation tools, the system is modeled with its actual operation in the form of a Petri net (PN). This allows studying the influence of faults on the system operation.

KEYWORDS. Fault modelling, Petri net, heat pump.

NOMENCLATURE

Symboles

A	Surface	$[m^2]$
BP	Basse pression	$[Pa]$
HP	Haute pression	$[Pa]$
I	Intensité	$[A]$
Q	Débit	$[m^3/s]$
T	Température	$[K]$
V	Volume	$[m^3]$

Indice

b	Bouteille anti-coups de liquide
c	L'état consigne
l	L'état liquid
m	L'état maintenance
m_l	Niveau de la maintenance
R	Fluide frigorigène

1 INTRODUCTION

La sûreté de fonctionnement (SdF) est considérée comme la science des défaillances et des pannes. Elle constitue un ensemble de méthodes et de concepts pour la maîtrise des risques. Avant de modéliser

le système avec ses défauts, une étude de SdF doit être réalisée en passant par deux volets complémentaires (Schneider, 2004) : une analyse fonctionnelle qui va caractériser les fonctions du système dans toutes les phases de son cycle de vie, et une analyse dysfonctionnelle qui déterminera l'ensemble des défaillances pouvant survenir n'importe où dans le système qu'elles soient seules ou combinées entre elles tout en analysant l'impact de ces pannes. Les résultats de ces deux études sont mis en commun lors de la modélisation du système.

Afin de modéliser le système, on utilise des méthodes statiques (AMDEC, diagramme de fiabilité, arbres de défaillance, etc.) ou des méthodes dynamiques (les réseaux Bayésiens, les chaînes de Markov ou les réseaux de Pétri) (Noyes et Pérès, 2007). Une méthode statique consiste en une analyse qualitative des risques. Celle-ci est une estimation statistique qui ne peut pas rendre compte de tous les changements d'état d'un système au cours du temps. Quant à elles, les méthodes stochastiques dynamiques permettent de prendre en compte les spécificités des systèmes dynamiques.

Tout d'abord, le réseau Bayésien est un graphe acyclique qui ne permet pas de modéliser un système général. Cette méthode n'a pas été étudiée. D'une part, l'intégration de variables continues est impossible. D'autre part, la modélisation de systèmes complexes est très difficile (Pourret et al., 2008). C'est pourquoi, les chaînes de Markov et les réseaux de Pétri qui sont des graphes cycliques ont été étudiés.

Une chaîne de Markov utilise une matrice de transition pour fonctionner. Chaque cellule de la matrice indique la probabilité à chaque état fini de passer vers un autre état fini. Cette méthode trouve rapidement ses limites à cause de l'explosion rapide du nombre d'états (Seng et Barras, 2014). Cela signifie que le nombre de cellules augmente quadratiquement dès que des états sont ajoutés. Les chaînes de Markov ne sont donc pas adaptées aux systèmes complexes. Ainsi, les réseaux de Pétri ont montré plusieurs avantages par rapport aux chaînes de Markov (Ferreira et al., 2018). La représentation graphique décrit le problème de manière intuitive. De plus, les réseaux de Pétri simulent précisément des situations complexes en permettant l'incorporation d'une multitude de règles dans le modèle. Par ailleurs, elles maintiennent la taille du modèle dans des limites raisonnables. Grâce à ses différentes caractéristiques, les réseaux de Pétri ont été choisis pour cette étude.

La pompe à chaleur (PAC) est un système de chauffage/refroidissement qui exploite des énergies renouvelables. D'après la Figure 1, elle utilise 60% d'énergie renouvelable pour chauffer le bâtiment (lors qu'elle fonctionne en mode chauffage). Aussi, on peut le constater que le chauffage par PAC génère une consommation bien inférieure à la plupart des chauffages classiques comme les chaudières à condensation ou solaire, les radiateurs électriques ou encore les panneaux rayonnants, etc. Elle est à 125% de rendement sur l'énergie primaire. Toutefois, les performances réelles des PACs sont différentes des performances théoriques qui sont calculées par simulation dans des conditions idéales de fonctionnement. Ces écarts sont d'approximativement 20% (Figure 2) et peuvent être expliqués en partie par les conditions météorologiques et l'usage réel de la PAC qui sont différents des données adoptées pour la simulation. Dans cet article, les défauts d'usage majeurs de la PAC sont étudiés, qui pourraient impacter la consommation d'énergie et le confort tout au long du cycle de vie du bâtiment.

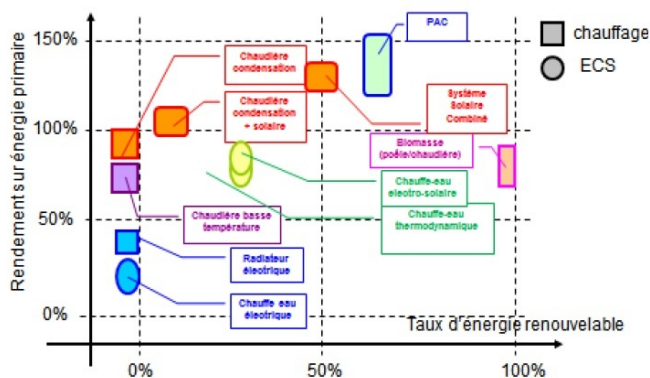


FIGURE 1. Position des performances saisonnières des solutions énergétiques (Ademe, 2014)

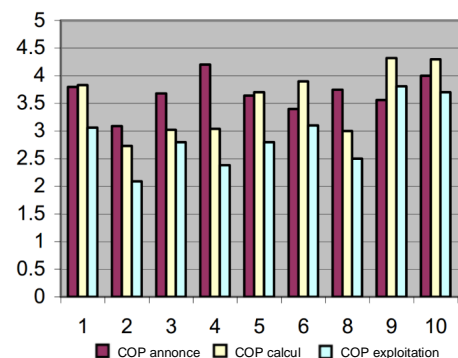


FIGURE 2. Les performances de la PAC (Ademe, 2007)

2 ANALYSE FONCTIONNELLE DU SYSTÈME

Outre les quatre éléments principaux de la PAC que sont l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur, d'autres composants sont utilisés dans le circuit frigorifique dans le but de permettre le fonctionnement efficace du système. Par exemple, on peut trouver la vanne électromagnétique, la bouteille anti-coups de liquide, le pressostat basse/haute pression, la vanne d'inversion 4 voies, etc. Le fonctionnement de la PAC dans des conditions normales est illustré dans le schéma en Figure 3.

Afin d'analyser le fonctionnement d'une PAC, le diagramme enthalpique (de Mollier) permet de comprendre le cycle frigorifique en suivant l'évolution du fluide au cours de chaque transformation d'un état initial à un état final en déterminant les différentes enthalpies associées. Le diagramme est disponible sur la Figure 4.

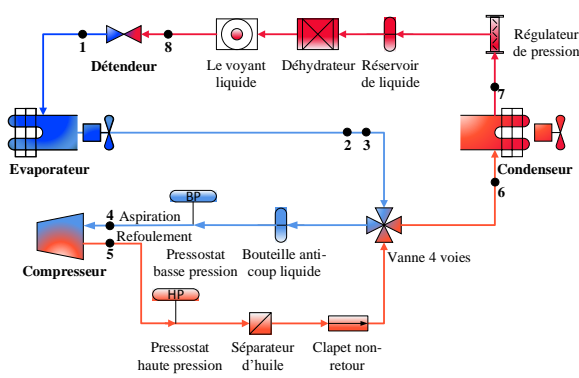


FIGURE 3. Configuration de la pompe à chaleur en mode de chauffage

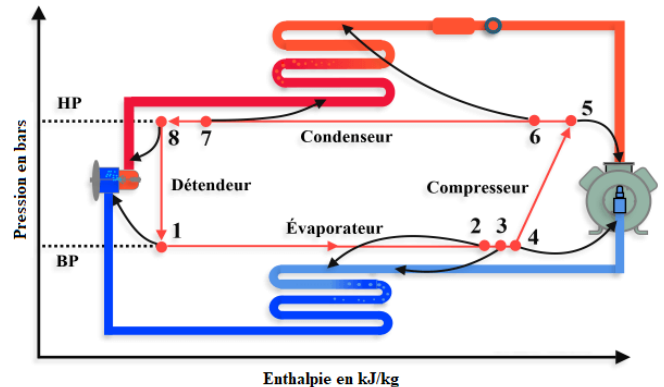


FIGURE 4. Diagramme enthalpique associé à une PAC (Clim, 2017)

2.1 LE FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PHASE GAZEUSE

La PAC démarre dès qu'elle est alimentée en énergie. Lorsque la bobine est sollicitée (1), le clapet se soulève et permet l'écoulement du fluide. À l'entrée de l'évaporateur, le fluide frigorigène (FF) est à l'état liquide et à basse température. Au début de l'évaporation, un mélange de phase vapeur et liquide de FF peut être observé, mais la proportion de phase liquide est à ce moment-là majoritaire. Puis, le fluide s'évapore progressivement (1 → 2) tandis que sa température augmente entraînant une surchauffe (2 → 4) pendant la récupération de l'énergie thermique de la source froide (l'air, l'eau ou le sol). Cet échange thermique va permettre d'inverser la proportion de phase vapeur/ phase liquide du FF, pour avoir finalement en sortie d'évaporateur le FF à l'état gazeux qui sera aspiré par le compresseur.

À la sortie de l'évaporateur, le FF à l'état gazeux accède au compresseur par la vanne d'inversion de cycle. Elle permet d'inverser l'écoulement du fluide afin d'obtenir l'effet souhaité, à savoir chauffage ou refroidissement.

Venant de la vanne d'inversion, le FF traverse la bouteille anti-coup de liquide qui devra assurer la re-vaporisation du liquide piégé pour protéger le compresseur d'une éventuelle migration de liquide par la conduite d'aspiration qui causerait des dégâts irréversibles. Autrement dit, il est certain que le fluide est à l'état gazeux avant d'atteindre le compresseur.

Le pressostat base-pression est un organe important du circuit frigorifique. Celui-ci arrêtera le compresseur si la pression du circuit coté base-pression descend en dessous de la valeur de coupure et protégera de cette façon le circuit frigorifique.

Ensuite, le FF à l'état gazeux va entrer dans le compresseur et atteindre la pression souhaitée (4 → 5). Dans le compresseur, des appareils de sécurité jouent un rôle important. Par exemple, la résistance de carter est indispensable pour éviter que le FF migre en trop grande quantité dans le carter, notamment quand les compresseurs sont soumis à des températures plus froides que celle des évaporateurs. Le contrôleur de niveau d'huile vérifie en permanence que la quantité d'huile dans le carter est suffisante, et arrête le compresseur si celle-ci est trop basse. Le pressostat différentiel d'huile arrête également le compresseur si la différence de pression existante entre le circuit de lubrification et

le carter est inférieure à l'écart de pression normal. Le régulateur de capacité permet, en établissant un bypass entre la conduite d'aspiration et de refoulement, d'adapter la puissance du compresseur et la charge variable de l'évaporateur.

Le pressostat haute-pression situé à côté de la conduite de refoulement du compresseur qui permet de protéger l'installation en cas de pression trop élevée. Puis, le FF traverse le séparateur d'huile qui sépare celui-ci de l'huile contenue dans le carter. Ensuite, le FF traverse un clapet anti-retour qui permet de contrôler son sens de circulation. Il permet le passage du FF dans un seul sens et le bloque si le sens de celui-ci venait à s'inverser. Enfin, le FF à l'état gazeux et à haute température accède au condenseur par la vanne d'inversion.

2.2 LE FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PHASE LIQUIDE

En passant dans le condenseur, le FF se condense progressivement ($5 \rightarrow 6$) alors que sa température baisse jusqu'à l'état de sous-refroidissement ($7 \rightarrow 8$). Il cède son énergie thermique à la source chaude (air intérieur ou eau sanitaire) ($6 \rightarrow 7$). Cet échange thermique permet d'inverser la proportion de vapeur/liquide du FF pour avoir finalement en sortie du condenseur le FF à l'état liquide.

Dans le condenseur, le régulateur de pression va maintenir celle-ci dans des valeurs acceptables quelque soient les conditions extérieures. Situé en sortie du condenseur, le réservoir de liquide, équipé d'une vanne de départ liquide, reçoit le FF à l'état liquide venant du condenseur et alimente le détendeur en FF de façon correcte. Il permet les fluctuations de volume de FF dues aux différentes températures de fonctionnement, aux ouvertures et fermetures du détendeur et aux variations de charge.

En ligne liquide, le déshydrateur est un organe important du circuit frigorifique qui possède trois principales fonctions : supprimer l'humidité, neutraliser les acides et filtrer les particules fines. Le voyant liquide qui est installé juste après le déshydrateur permet de contrôler la présence d'humidité dans le circuit frigorifique et l'état du FF dans la conduite liquide du circuit frigorifique.

Lorsque le fluide frigorigène traverse le détendeur ($8 \rightarrow 1$), sa pression et sa température diminuent. Le détendeur intègre une vanne électromagnétique qui permet d'alimenter correctement l'évaporateur en FF. Le FF est à nouveau à l'état liquide et à basse température, et le cycle peut recommencer.

3 ANALYSE DYSFONCTIONNELLE DU SYSTÈME

Un système parfait n'existe pas. En effet, différents défauts peuvent impacter le fonctionnement d'une PAC, notamment les défauts d'usage. Un défaut d'usage d'un système énergétique est une manifestation d'un phénomène anormal qui se produit pendant le fonctionnement du système (Vigan, 2015). Le dysfonctionnement d'une PAC est analysé dans cette partie ci-dessous.

3.1 LE FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PHASE GAZEUSE

Dans le cas où la vanne électromagnétique du détendeur est trop ouverte (défaut 1 ou transition T1.12 sur la Figure 5), celle-ci laisse passer trop de FF à l'état liquide dans l'évaporateur. Le volume de FF est donc supérieur à la capacité de surchauffe de l'évaporateur. Ainsi, à la sortie de l'évaporateur, il subsiste un mélange liquide/gaz de FF. Au contraire, si la vanne électromagnétique du détendeur n'est pas assez ouverte (défaut 2 ou transition T1.11 sur la Figure 5), celle-ci ne laisse passer que peu de FF à l'état liquide. Le FF est donc en quantité réduite, inférieure à la quantité nécessaire pour garantir un fonctionnement stable de chacun des composants, les cycles de fonctionnement du système sont longs.

Le ventilateur (dans le cas d'un système à air) ou la pompe (dans le cas d'un système à eau) est essentiel au processus d'évaporation. Pendant l'utilisation de la PAC, plusieurs défauts peuvent survenir à ce niveau (défaut 4 ou transition T2.22 sur la Figure 5). Par exemple, des pales du ventilateur peuvent être détériorées (par la grêle ou le vandalisme), l'hélice peut patiner sur l'axe du moteur, le moteur du ventilateur peut tomber en panne ou ne pas être correctement alimenté en énergie, le filtre à air peut s'encrasser (à cause de poussières, d'insectes ou de feuilles qui peuvent réduire la surface échange au niveau de l'évaporateur), le ventilateur peut se mettre à tourner à l'envers (par vent violent par exemple) ou peut ne plus tourner à sa vitesse nominale. Tous ces événements peuvent provoquer des chutes de débit d'air à l'évaporateur, et provoquer le givre de l'évaporateur. Plus faible est le débit

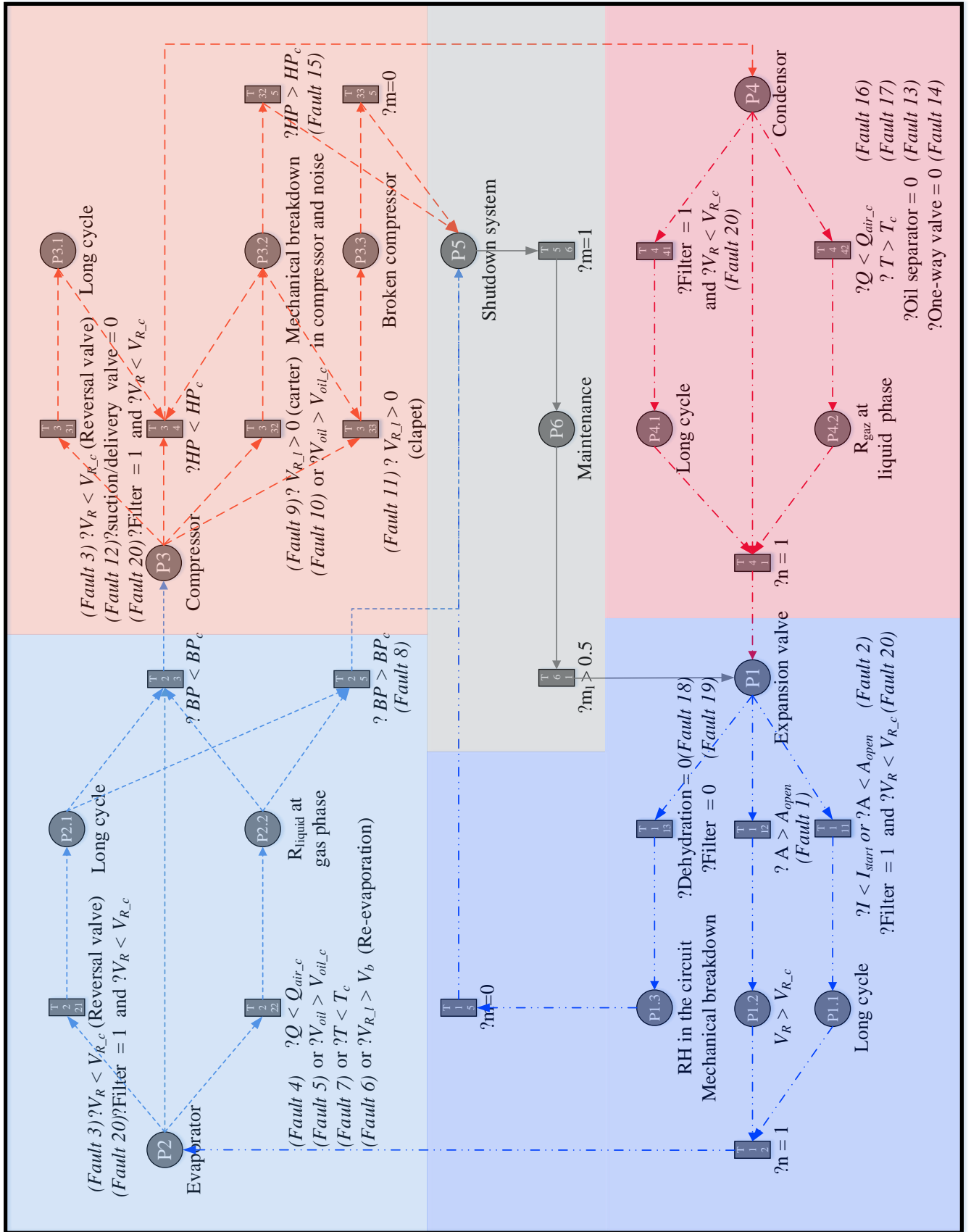


FIGURE 5. Réseau de Pétri de la PAC

d'air à l'évaporateur, moins efficace sera la surchauffe. C'est pourquoi, le FF reste à l'état liquide en sortie de l'évaporateur.

Pendant l'utilisation de la vanne d'inversion, des défauts mécaniques peuvent survenir (défaut 3 ou transition T2.21 sur la Figure 5). Par exemple, la bobine peut être défectueuse ou non alimentée, la vanne peut être coincée mécaniquement, les capillaires peuvent être bouchés. Après avoir traversé celle-ci, il n'y a donc pas assez de FF.

Concernant la bouteille anti-coup de liquide, si l'huile de lubrification de l'évaporateur migre de façon soudaine et en quantité élevée dans la bouteille, notamment au démarrage de la PAC (défaut 5 ou transition T2.22 sur la Figure 5) ou si le volume du FF à l'état liquide est supérieur la capacité de stockage de liquide de la bouteille (défaut 6 ou transition T2.22 sur la Figure 5), alors le FF reste à l'état liquide en sortie de la bouteille anti-coup de liquide.

Quand le FF n'est pas assez surchauffé (défaut 7 ou transition T2.22 sur la Figure 5), celui-ci se retrouve en phase liquide dans le carter du compresseur (défaut 9 ou transition T3.32 sur la Figure 5). En effet, le niveau d'huile continue dans le carter augmente artificiellement par la présence de FF à l'état liquide. Cela peut occasionner une défaillance mécanique, ou une formation de mousse. Par ailleurs, le FF à l'état liquide peut désamorcer la pompe d'huile (défaut 10 ou transition T3.33 sur la Figure 5) qui peut ne plus lubrifier correctement le compresseur. Dans ce cas précis, les parties mobiles du compresseur seront mal lubrifiées provoquant une usure des pièces accélérée. Dans le cas où le FF à l'état liquide arrive directement au niveau des clapets du compresseur (défaut 11 ou transition T3.31 sur la Figure 5), le FF à l'état liquide étant incompressible, le compresseur peut être endommagé. De plus, pendant l'utilisation du compresseur, le clapet d'aspiration ou de refoulement du compresseur peut être hors service (défaut 12 ou transition T14 sur la Figure 5) qui peut provoquer une chute de débit du FF, les cycles de fonctionnement du compresseur sont longs et la température de consigne est difficile à atteindre.

Dans le cas où le séparateur d'huile (défaut 13 ou transition T4.42 sur la Figure 5) ou le clapet anti-retour (défaut 14 ou transition T4.42 sur la Figure 5) ne fonctionne pas bien, l'huile est mélangée avec le FF à l'état gazeux sortant du compresseur et reste dans le circuit frigorifique. Cela peut modifier la qualité, les propriétés physiques et thermodynamiques du FF.

3.2 LE FLUIDE FRIGORIGÈNE EN PHASE LIQUIDE

Comme l'évaporateur, le condenseur possède des défauts mécaniques similaires (défaut 16 ou transition T4.42 sur la Figure 5) qui peuvent survenir pendant son utilisation. Dans ce cas, plus faible est le débit d'air du condenseur, moins efficace sera le sous-refroidissement. Quand le FF n'est pas assez sous-refroidi (défaut 17 ou transition T4.42 sur la Figure 5), celui-ci ne se condense que partiellement par rapport au fonctionnement normal du condenseur. Le FF est donc encore à l'état gazeux en sortie du condenseur.

Dans le circuit frigorifique, les causes d'introduction d'humidité sont nombreuses. Lors du remplacement d'un composant sans précaution ou suite à une fausse manœuvre, le givre ou la condensation peuvent facilement se former dans un conduit ou un composant dans lequel s'est introduit de l'air humide. Dans le cas où le déshydrateur est en mauvais état (défaut 18 ou transition T1.13 sur la Figure 5) ou le filtre des 4 composants principaux est cassé (défaut 19 ou transition T1.13 sur la Figure 5), cela peut entraîner la formation de cristaux de glace dans le détendeur, la formation d'acide dangereux qui oxyde les métaux provoquant notamment une corrosion des composants, la formation de boues préjudiciables à la rigidité diélectrique de l'huile. Tous ces événements peuvent entraîner des frottements répétés dans les différents composants, notamment pendant l'utilisation du détendeur.

Dans tous les cas, si le filtre des 4 composants principaux est partiellement bouché (défaut 20 ou transition T1.11, T2.21, T3.31, T4.41 sur la Figure 5), la quantité de FF traversant ces composants est diminué et la production d'énergie associée au FF est donc faible.

4 MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT RÉEL DU SYSTÈME SOUS FORME DE RÉSEAU DE PÉTRI

4.1 RÉSEAU DU PÉTRI

Le principe du RdP est de représenter toutes les évolutions possibles d'un système. Il s'agit d'une modélisation du comportement d'un système dynamique à événements discrets basée sur des places et des transitions. Chaque place permet de modéliser un état du système tandis que chaque transition représente un événement qui va entraîner une évolution du système.

Outre les deux éléments principaux, le RdP contient également un jeton. Il est disposé dans les places, dont sa position évolue dans le temps et indique l'état du système. Enfin, chaque place et chaque transition sont reliées par des arcs orientés. Chaque arc est associé à un nombre entier appelé le poids de l'arc. Dans cette étude, le RdP n'utilise qu'un jeton, donc tous les arcs sont de poids 1, on parle de RdP ordinaire. De plus, chaque transition a exactement une entrée et une sortie, on parle de réseau automate fini. Chaque transition contient des assertions et des prédicats qui permettent respectivement de modifier des paramètres du modèle et d'interroger une ou plusieurs variables du système. Une fois qu'une transition est sensibilisée, c'est-à-dire que la place en entrée reliée à cette transition contient un jeton et que le prédicat associé à cette transition est vérifié, alors le jeton de la place en entrée de cette transition est retiré et ajouté à la place en sortie.

Nous avons ainsi modélisé la PAC et ses défauts selon le RdP du schéma de la Figure 5 qui est explicité dans la partie 3. Les couleurs des arcs (bleu ciel : flèche demi trait, orange : flèche trait, rouge : flèche tiret-point, bleu foncé : flèche tiret-point-point) utilisées dans le RdP correspondent aux celles utilisées dans les Figure 3 et Figure 4. Cela permet d'identifier à quelle partie du système est associé l'évolution modélisée dans le RdP.

4.2 FONCTIONNEMENT DU RÉSEAU DE PÉTRI

Le RdP de la PAC modélisé sur le schéma de la Figure 5 possède les places $P1$ à $P6$, les transitions, un jeton et des arcs orientés représentés par les flèches. Avant le démarrage du système, le jeton est dans la *place P1*. Dès que la PAC démarre, le FF entre dans le circuit frigorifique. Dans le cas où la vanne électromagnétique du détendeur est trop ouverte (*transition T1.12*), celle-ci laisse passer trop de FF à l'état liquide dans l'évaporateur et le jeton se déplace dans la *place P1.2*. Le volume de FF est donc supérieur à la capacité de surchauffe de l'évaporateur. Si, en traversant la bouteille anti-coup de liquide, le FF à l'état liquide s'évapore correctement alors le FF n'est qu'à l'état gazeux à la sortie de la bouteille. Le système fonctionne donc en continu dans des conditions normales. Au contraire, le volume du FF à l'état liquide est supérieur la capacité de stockage de liquide de la bouteille (*transition T2.22*), alors le FF reste à l'état liquide en sortie de la bouteille anti-coup de liquide (*place P2.2*). Ensuite, celui-là se retrouve dans le carter du compresseur (*transition T3.32*). Cela peut occasionner une défaillance mécanique (*place P3.2*). Dans le cas où le FF à l'état liquide arrive directement au niveau des clapets du compresseur (*transition T3.33*), le FF à l'état liquide étant incompressible, le compresseur peut être endommagé (*place P3.3*). Au contraire, si le compresseur est cassé, le système s'arrête tout de suite, le jeton est dans la *place P5*. Dans ce cas, si l'intervention de maintenance est ponctuelle (*transition T5.6*), le système est à l'état de maintenance corrective. Il a besoin d'un technicien très qualifié. Si la maintenance est bien fait (*transition T6.1*), le système retourne à l'état de la fonctionne normales (*place P1*). Dans des cas négatives, si l'entretien n'est pas bien réalisé, le système retourne à l'état des défauts.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Le principal objectif de cette étude est de modéliser des défauts d'usage d'une PAC sous forme d'un RdP. Nous avons réalisé une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle sur la circulation du FF d'une PAC. D'après ces deux études, nous avons pu constater que des défauts d'usage peuvent survenir tout au long du cycle de vie d'une PAC. Les défauts sont majoritairement situés au niveau du fluide frigorigène en phase gazeuse. Ils sont ensuite modélisés sous forme d'un RdP. Ce RdP est cyclique

puisque'il correspond au fonctionnement cyclique de la PAC. Grâce au RdP, il est possible de décrire le fonctionnement de la PAC et de modéliser l'influence sur sa performance des défauts recensés lors de l'analyse dysfonctionnelle.

Dans la suite de nos recherches sur le sujet, nous réaliserons le couplage entre le RdP et un modèle physique de la PAC à l'aide d'un code Python. Ainsi, il sera possible de modéliser le comportement dynamique de ce système. Enfin, nous le couplerons à l'outil de simulation énergétique dynamique du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) : COMETh. Par la simulation, nous pourrions donner une distribution de probabilité des performances réelles d'une PAC en intégrant ses défauts d'usage.

Il est essentiel de mentionner les limites de l'étude actuelle, qui devraient être abordées dans la recherche future. Cette étude n'a été réalisée que sur la circulation du FF d'une PAC. Par la suite, nous avons également prévu de prendre en compte la circulation de l'huile (dans des 04 composants principaux), la circulation d'air/eau (dans les échangeurs thermiques) et la régulation du système. D'ailleurs, nous prendrons en compte également les défauts de mise en oeuvre puisqu'ils jouent un rôle important dans le fonctionnement et la performance d'une PAC. En intégrant les informations ci-dessus, il sera possible de modéliser le fonctionnement général d'une PAC.

RÉFÉRENCES

- Ademe (2007). *Instrumentation de sites équipés de PACS géothermiques et air ou eau en résidentiel*. Group Ademe.
- Ademe (2014). *Modes de chauffage dans l'habitat individuel*. Group Ademe.
- Clim, A. (2017). *L'ABC de la climatisation*. ABC Clim.
- Ferreira, C., Neves, L. C., Silva, A., et de Brito, J. (2018). Stochastic petri net-based modelling of the durability of renderings. *Automation in Construction*, 87 :96–105.
- Noyes, D. et Pérès, F. (2007). Analyse des systèmes-sûreté de fonctionnement. *Techniques de l'ingénieur*.
- Pourret, O., Naïm, P., et Marcot, B. (2008). *Bayesian networks : a practical guide to applications*, volume 73. John Wiley & Sons.
- Schneider (2004). *La Sûreté de Fonctionnement*. Le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel.
- Seng, B. et Barras, C. (2014). Développement d'une méthode de prise en compte des dysfonctionnements et du vieillissement des composants et systèmes de ventilation.
- Vigan, J. (2015). *Le dictionnaire général du Bâtiment*. Grand Dicobat.