

Interreg



EUROPEAN UNION

Grande Région | Großregion

PtH4GR²ID

Fonds européen de développement régional | Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Sous action 12.2

Réalisation des tests et évaluation

RAPPORT

Contenu

1. Partenaires de l'action 12.....	2
2. Objectifs de l'action 12.....	3
3. Approche	3
4. Résultats.....	5

Table des figures

Graphique 1. Test de Référence – Température du ballon de stockage.....	6
Graphique 2. Test avec Contrôleur Prédicatif - Température du ballon de stockage	6
Graphique 3. Test de Référence – Evolution de la température interne de la zone	6
Graphique 4. Test avec Contrôleur Prédicatif – Evolution de la température interne de la zone.....	6
Graphique 5. Profil de prix imposé au cours des tests.....	7
Graphique 6. Test de Référence - Evolution du comportement de la PAC en fonction du prix de l'électricité.....	7
Graphique 7. Test avec contrôleur prédictif - Evolution du comportement de la PAC en fonction du prix de l'électricité.....	7
Graphique 8. Aide au réseau dans le cas du test de référence et du test avec MPC.....	8
Tableau 1. Résultats des tests selon les indicateurs de performances.....	7

1. Partenaires de l'action 12

Partenaires opérationnels :

- ULg/BEMS

Partenaires méthodologiques :

- VSE
- Enovos
- DTC
- Stiebel Eltron
- EIFER

2. Objectifs de l'action 12

L'objectif de l'action 12 est de tester le contrôleur prédictif (MPC) développé dans le projet. Ce contrôleur sera testé dans différentes situations et selon différents scénarios. Ces tests permettront d'une part d'optimiser les paramètres du contrôleur, et d'autre part de comparer les performances du contrôleur avec les performances d'un contrôleur classique communément retrouvé dans des installations comprenant une pompe à chaleur (PAC), un ballon de stockage et un plancher chauffant.

Lors de L'action 12.2, des tests seront menés en appliquant au contrôleur prédictif différents paramètres et différents scénarios. Un test sera également mené en appliquant un contrôle classique. Les performances de ces stratégies de contrôle sont évaluées sur base de différents indicateurs de performances : l'impact sur le réseau, mais également la consommation énergétique (électricité), le coût, le confort thermique, ...

3. Approche

Différents indicateurs permettent de comparer les performances des contrôleurs (c'est-à-dire le contrôleur « classique » et le contrôleur « prédictif » avec différents paramètres). Ces indicateurs vont être expliqués. Les conditions générales des différents tests vont également être décrites. Les résultats des tests seront ensuite analysés.

Indicateurs de performance :

Déterminer les performances d'un contrôleur n'est pas simple. Le contrôleur doit en effet répondre à de multiples consignes, tout en étant soumis à plusieurs contraintes de différentes natures. L'optimum est souvent un compromis à trouver entre consignes et contraintes (parfois contradictoire) et il n'existe pas une solution unique.

Par exemple, le rendement de la pompe à chaleur sera meilleur lorsque la température extérieure est plus élevée (dans le cas d'une pompe à chaleur aérothermique) mais la pompe à chaleur a besoin d'électricité pour fonctionner et le prix de l'électricité fluctue selon un profil qui ne correspond pas forcément à la température extérieure. Le contrôleur prédictif possède un modèle mathématique du fonctionnement de la pompe à chaleur qui l'optimisera en fonction de ces contraintes mais également en fonction de la demande de chaleur du bâtiment.

Il en va de même pour le ballon de stockage : le ballon pourrait être chauffé au maximum lorsque le prix de l'électricité est le plus bas, mais cela augmenterait les pertes thermiques. A nouveau, c'est le contrôleur prédictif qui va optimiser la température du ballon en fonction de la demande de chaleur du bâtiment, du prix de l'électricité, du rendement de la pompe à chaleur, ...

En plus du bâtiment et de l'optimisation du fonctionnement de la pompe à chaleur s'ajoute la dimension du réseau car l'objectif du projet PtH4GR²ID est de déterminer la contribution des pompes à chaleur dans la régulation du réseau électrique. Le contrôleur prédictif devra donc également s'adapter aux contraintes du réseau électrique et faire fonctionner la pompe à chaleur au moment où il y a beaucoup d'électricité sur le réseau. A l'inverse, il devra minimiser le fonctionnement de la

pompe à chaleur lorsque le réseau est déficitaire. Dans ce cas, un stockage de chaleur devra être anticipé par le contrôleur.

Comme dit précédemment, entre les consignes et les contraintes auxquelles est soumis le contrôleur, la solution est souvent un compromis à trouver et il n'existe pas une seule solution. C'est pourquoi le contrôleur sera testé selon différents paramètres. Ces paramètres reflètent le compromis entre la minimisation du coût pour l'utilisateur, le confort thermique, l'aide apportée au réseau, ...

Les différents indicateurs qui vont permettre d'évaluer les performances du contrôleur sont les suivants :

- Energie thermique délivrée par la PAC (kWh_{th}) : comme son nom l'indique, il s'agit de l'énergie thermique (chaleur) totale fournie par la pompe à chaleur. Cet indicateur est basique mais il permettra, grâce à d'autres indicateurs, de déterminer si la pompe à chaleur a fonctionné selon la stratégie la plus opportune (au moment où le prix de l'électricité était bas, au moment où son rendement était le meilleur, avec une consigne qui permet de limiter aux maximums les pertes au ballon de stockage, ...). Cet indicateur s'exprime en kWh, on parlera aussi de kWh thermique (kWh_{th}) pour le différencier de l'indicateur suivant.
- Energie électrique consommée par la PAC (kWh_{el}) : il s'agit de l'énergie électrique utilisée par la pompe à chaleur pour fournir la chaleur. Tout comme l'indicateur précédent, cet indicateur permettra de déterminer si la pompe à chaleur a fonctionné selon la stratégie la plus opportune. Cet indicateur s'exprime en kWh ou plus précisément de kWh électrique (kWh_{el})
- Coût total (unité monétaire) : cet indicateur permettra de déterminer l'avantage pour le propriétaire de la PAC. A noter que le profil de prix appliqué variait de 1 à 4 (profil non réaliste). Cela a été réalisé pour mieux visualiser le comportement du contrôleur lors des tests (voir rapport 12_1). C'est pourquoi l'unité de cet indicateur n'est pas conventionnelle. On parlera « d'unité monétaire » (et pas d'euros).
- Prix moyen (unité monétaire/ kWh_{el}) : cet indicateur permettra de déterminer si la pompe à chaleur a fonctionné au moment où le prix de l'électricité était le plus optimal.
- Confort thermique : cet indicateur permettra de déterminer si le confort a été respecté, c'est-à-dire si la consigne de température imposée dans la zone a été respectée malgré les perturbations auxquelles le bâtiment est soumis.
- COP_moyen : le coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur permet également de déterminer si la pompe à chaleur a fonctionné au moment les plus optimum, c'est-à-dire lorsque son rendement était le meilleur. Le calcul du COP est le suivant :

$$COP = P_{thermique} / P_{electrique}$$

Le COP n'a pas d'unité. De façon simplifiée, on peut dire que plus le COP moyen est élevé, plus la pompe à chaleur a fonctionné avec un rendement élevé.

- Aide au réseau (KWh/niveau_prix) : ce critère permettra de déterminer la consommation électrique de la pompe à chaleur en fonction du niveau de prix. Il sera divisé en plusieurs éléments en fonction du nombre de « niveaux de prix » définis. Comparer à la situation de référence, il permettra de déterminer si la consommation électrique de la pompe à chaleur a été déplacée (on parlera de « déplacement de charges ») à des moments opportuns. Dans ce cas de figure, on considère que le niveau de prix de l'électricité reflète l'état du réseau (prix élevé = réseau déficitaire en électricité et à l'inverse prix faible = beaucoup électricité disponible).

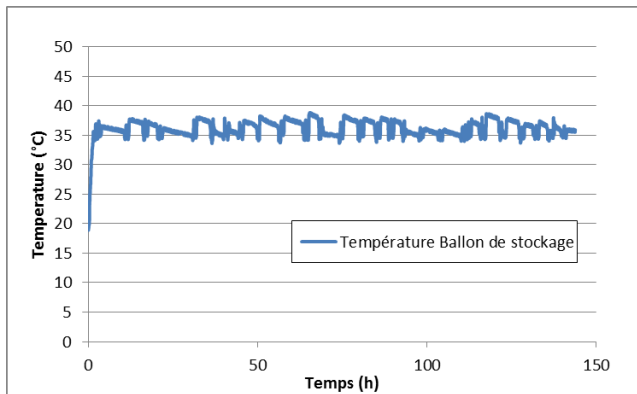
ON/OFF PAC : le nombre d'arrêts/démarrages de la pompe à chaleur est comptabilisé. Ce critère peut mettre en évidence les contraintes de fonctionnement imposées à la pompe à chaleur ainsi qu'une usure plus ou moins importante.

4. Résultats

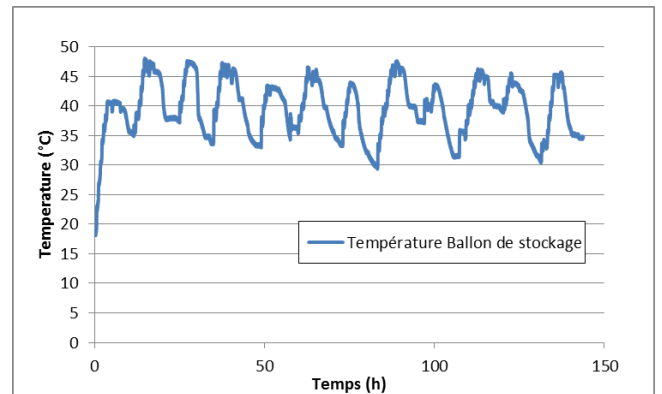
Comme précédemment expliqué, les résultats des tests avec le contrôleur prédictif sont comparés à un test considéré comme un test de référence, avec un contrôleur classiquement retrouvé dans les installations résidentielles possédant une pompe à chaleur.

Afin de saisir le comportement des différents contrôleurs (classique contre prédictif), il est tout d'abord intéressant de visualiser leur comportement. Un monitoring en continu avec un enregistrement des données (température, débit, ...) permet de tracer les graphiques 1 à 4. ci-dessous

Le Graphique 1 et le Graphique 2 permettent de visualiser la température du ballon de stockage, et ainsi, le comportement de la pompe à chaleur. Dans le test de référence (Graphique 1), la température du ballon de stockage est constante (35°C), la régulation appliquée utilise une hystérésis. Dans le test avec contrôleur prédictif (Graphique 2), c'est le contrôleur qui impose la température du ballon de stockage. Cette température est optimisée en fonction du prix de l'électricité, des prévisions météo, ...



Graphique 1. Test de Référence – Température du ballon de stockage

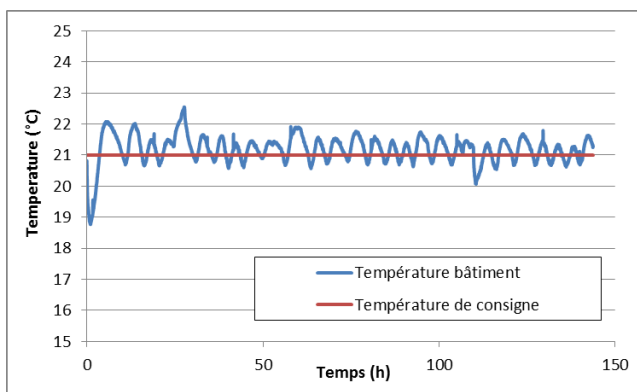


Graphique 2. Test avec Contrôleur Prédicatif - Température du ballon de stockage

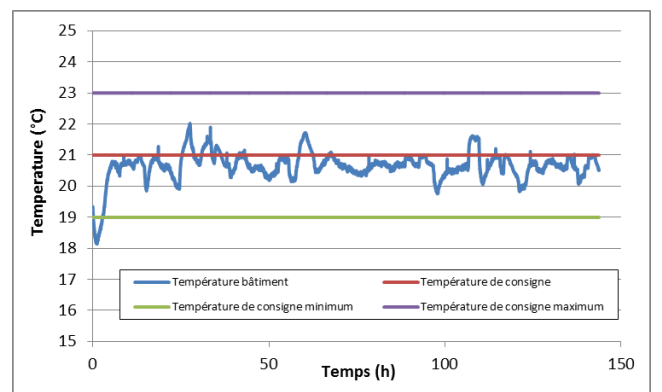
Le confort dans l'habitation peut lui aussi être analysé. Pour rappel, la zone est soumise à des perturbations (gains internes de chaleur provenant de l'électroménager et des habitants) et aux conditions météo extérieures à la zone, ce qui rend la régulation plus difficile.

Dans le cas du test de référence (Graphique 3), une température de consigne constante de 21°C a été imposée. Un régulateur PID sur la température d'entrée du plancher chauffant régule la température dans la zone. La température dans la zone oscille ainsi autour de la température de consigne.

Dans le cas du test avec le contrôleur prédictif (Graphique 4), le contrôleur impose la température à l'entrée du plancher chauffant. Cette température est optimisée en fonction des perturbations connues par le contrôleur prédictif. La température de consigne est également fixée à 21°C avec une plage de +/- 2°C à respecter. La température dans la zone est proche des 21°C et reste tout à fait dans la plage +/- 2°C imposée.



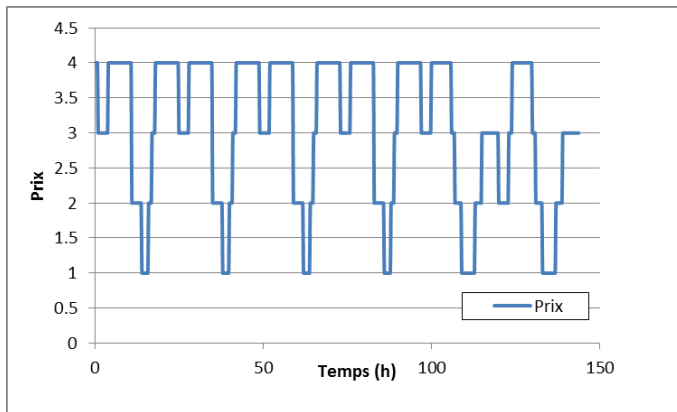
Graphique 3. Test de Référence – Evolution de la température interne de la zone



Graphique 4. Test avec Contrôleur Prédicatif – Evolution de la température interne de la zone

Le Graphique 5 montre le profil de prix imposé dans les différents tests réalisés. Les valeurs de prix varient de 1 à 4. Il est important de noter que ce profil de prix n'est pas réaliste : la valeur n'est pas en €/kWh ! Ce profil de prix a été imposé pour mieux visualiser le comportement du contrôleur.

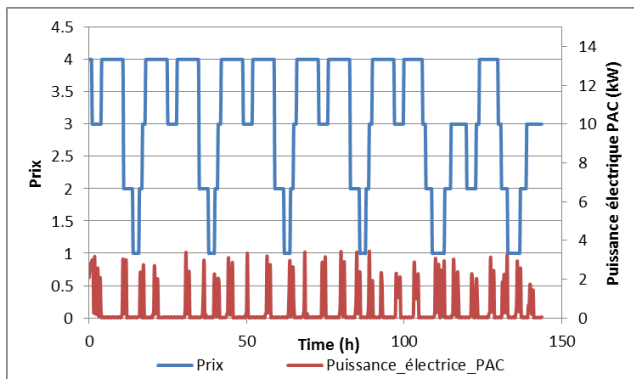
En effet, la paramétrisation du contrôleur est un équilibre entre le coût minimum pour l'utilisateur, l'usure minimum du matériel et le confort optimal pour l'occupant du bâtiment. Ces critères peuvent être contradictoires entre et eux et un profil de prix réaliste variant de 0.15 à 0.25 €/kWh aurait rendu plus difficile l'interprétation du comportement du contrôleur.



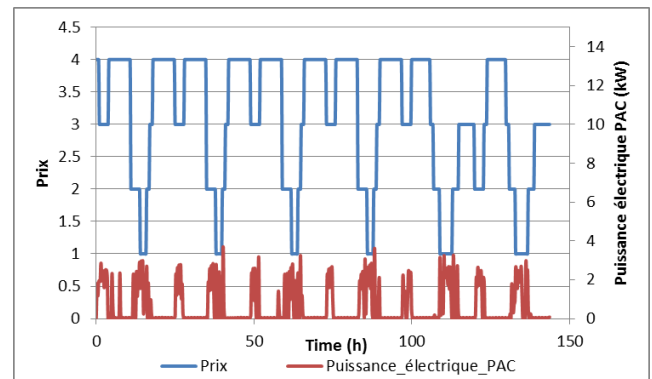
Graphique 5. Profil de prix imposé au cours des tests.

Le Graphique 6 et le Graphique 7 permettent de visualiser le comportement du contrôleur en fonction du prix de l'électricité. Dans le cas d'un contrôleur classique (Graphique 6), le contrôleur agit afin de maintenir la température dans le ballon de stockage (l'information sur le prix n'est pas prise en compte par le contrôleur). La consommation électrique de la pompe à chaleur (courbe rouge) n'est pas corrélée au prix (courbe bleue).

Dans le cas du test avec contrôleur prédictif (Graphique 7), le contrôleur optimise le fonctionnement de la pompe à chaleur en fonction du prix (entre autre). On observe que la consommation électrique de la pompe à chaleur, et donc son fonctionnement, se produit majoritairement lorsque le prix de l'électricité est plus faible.



Graphique 6. Test de Référence - Evolution du comportement de la PAC en fonction du prix de l'électricité



Graphique 7. Test avec contrôleur prédictif - Evolution du comportement de la PAC en fonction du prix de l'électricité

Le Tableau 1 donne les résultats des tests selon les indicateurs de performance décrit au point précédent :

	Test Référence	Test avec MPC
Energie thermique délivrée par la PAC (kWh _{th})	147	145
Energie électrique délivrée par la PAC (kWh _{el})	39	38.3
ON/OFF PAC	103	100
COP_moyen	3.78	3.78
Coût total	111	70
Prix moyen (unité monétaire/kWh_e)	2.84	1.82

Tableau 1. Résultats des tests selon les indicateurs de performances

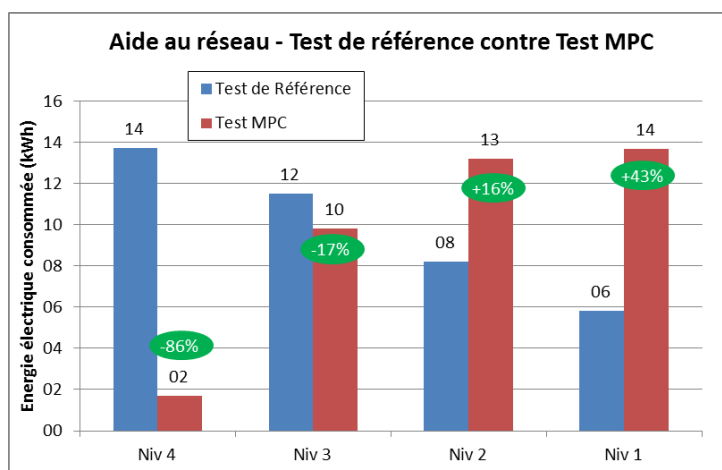
On constate ainsi un résultat positif du contrôleur MPC pour tous les indicateurs de performance : au niveau de la consommation électrique de la pompe à chaleur, de la production thermique et du nombre d'arrêts/démarrages, la différence est faible entre le test avec un contrôleur classique et le test avec le MPC :

- L'énergie thermique produite est quasiment similaire, ce qui est logique car il est nécessaire d'assurer le confort dans l'habitation.
- L'énergie électrique et le COP moyen sont quasiment similaires également, ce qui signifie que le contrôleur MPC n'a pas pu faire fonctionner la pompe à chaleur dans des conditions plus optimales que le contrôleur classique. Dans ce cas, cela signifie que le contrôleur prédictif n'a pas pu faire fonctionner la pompe à chaleur à des moments où la température extérieure était plus élevée.
- Le nombre d'arrêt/démarrage (ON/OFF) de la pompe à chaleur est similaire, ce qui signifie que l'utilisation d'un contrôleur MPC n'entraîne pas une usure prématurée de la pompe à chaleur (selon les paramètres définis dans le test).

La différence la plus significative concerne le coût total et le coût moyen avec des résultats très favorables pour le contrôleur MPC. En effet, la pompe à chaleur fonctionne principalement lorsque le prix de l'électricité est bas (voir Graphique 7), ce qui a un impact très positif sur le coût total.

Le Graphique 8 montre le fonctionnement de la pompe à chaleur en fonction du prix de l'électricité. Ainsi, lorsque le contrôleur MPC est appliqué, on observe une diminution de 86% de la consommation électrique lorsque le prix est le plus élevé. A l'inverse, la pompe à chaleur fonctionne lorsque le prix est bas (+16% et +43% pour les niveaux de prix 2 et 1).

En supposant que le prix de l'électricité reflète la disponibilité d'électricité sur le réseau électrique, ce critère reflète l'aide apportée au réseau électrique par le contrôleur MPC.



Graphique 8. Aide au réseau dans le cas du test de référence et du test avec MPC