



Étude de cas.

Étude sur le contrôle des systèmes hydroniques.

Introduction

L'évolution des modes de vie dans les pays industrialisés, où les personnes passent la plupart de leur temps dans des espaces clos, entraîne des changements considérables tant sur la consommation occasionnée au sein d'un bâtiment, que sur les exigences en termes de confort thermique, de confort d'éclairage et de qualité de l'air intérieur, ainsi que sur la manière de gérer ces services. Selon la Directive 2012/27/UE [1], les bâtiments représentent 40 % de la consommation finale d'énergie et environ 50 % de celle-ci est due aux systèmes de refroidissement et de chauffage. Dans le plan REPowerEU [2], l'Union européenne a récemment admis l'urgence d'une transition rapide vers un autre modèle énergétique pour que l'Europe puisse diversifier son approvisionnement en gaz, afin de lui permettre d'éliminer progressivement sa dépendance à l'égard des combustibles russes avant 2030. Une des méthodes adoptées consiste à doubler le rythme annuel de déploiement de pompes à chaleur (avec un déploiement prévu de 10 millions au cours des cinq prochaines années) [3].

En France, les logements résidentiels peuvent bénéficier d'aides « coup de pouce », qui proposent des primes de 3 000 €, le montant pouvant même être supérieur pour les foyers à revenus faibles et très faibles (jusqu'à 5 000 €), pour chaque chantier individuel consistant à remplacer une chaudière à charbon, à fuel ou à gaz (hormis chaudière à condensation) par des unités utilisant des énergies renouvelables (parmi lesquelles on retrouve la pompe à chaleur air-eau) [4].

Cette étude a pour objectif de démontrer que le déploiement de systèmes de contrôle intelligents dans les énergétiques d'un bâtiment. Pour cela, on présente une modélisation des stratégies de contrôle multizone proposées par l'entreprise Airzone pour les systèmes hydroniques, grâce au logiciel TRNSYS [5]. L'objectif est d'évaluer le potentiel d'un système de contrôle avec plancher chauffant-raffraîchissant multizone et ventilo-convection monozone, par rapport à une configuration plus conventionnelle utilisant un plancher chauffant-raffraîchissant sans régulation par zone. L'étude de cas porte sur une maison individuelle typique de l'architecture française. On effectue une analyse simulée dans diverses villes, afin d'évaluer l'influence de la météo sur les économies d'énergie et sur le confort obtenu avec chaque type d'installation et de contrôle. La simulation sur la production de chauffage se fait sur la période du 1 janvier au 30 avril et du 1 octobre au 31 décembre.

Stratégies de contrôle proposées

On propose de comparer deux stratégies de contrôle sur des installations à eau glacée utilisant une pompe à chaleur air-eau comme unité de production et un plancher chauffant-raffraîchissant et un ventilo-convector monozone comme unités terminales.

On oppose donc deux solutions de régulation de chauffage sur une période hivernale du 1 septembre au 31 mars pour des logements identiques situés sur deux villes différentes. Logement de 2 étages comprenant 5 zones. Une solution conventionnelle avec du plancher chauffant dans les 5 zones contre une solution multizone avec du plancher chauffant pour 2 zones au Rdc et 3 ventilo-convecteurs monozone pour les 3 zones de l'étage.

1| Système conventionnel

Pour ses avantages en matière de confort et d'efficacité, le plancher chauffant-rafrâîchissant est l'unité terminale de chauffage la plus généralement utilisée dans le secteur résidentiel français. Un circuit est installé dans chaque zone, et il n'y a souvent qu'un seul thermostat principal, installé dans la pièce principale de la maison, dans ce cas le salon. La régulation de la production est ainsi soumise aux besoins thermiques du salon. Dans le reste des zones, le plancher chauffant-rafrâîchissant est activé, mais sans contrôle individuel de la température dans chaque pièce (système sans régulation par zone). La figure 1 représente le schéma de la configuration.

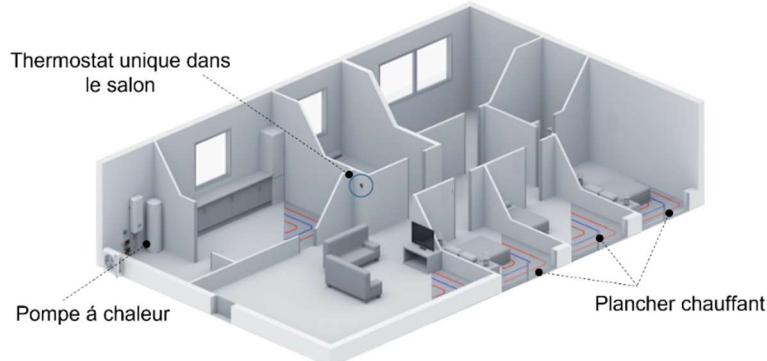


Figure 1. Schéma d'un système de plancher chauffant-rafrâîchissant conventionnel sans régulation par zone.

La température de production d'eau chaude de la pompe à chaleur est régulée, afin de maintenir une température de consigne de 35 °C, sur la base de la courbe de chauffage de l'unité, qui modifie la température de consigne en fonction de la température extérieure et intérieure, comme indiqué sur la figure 2.

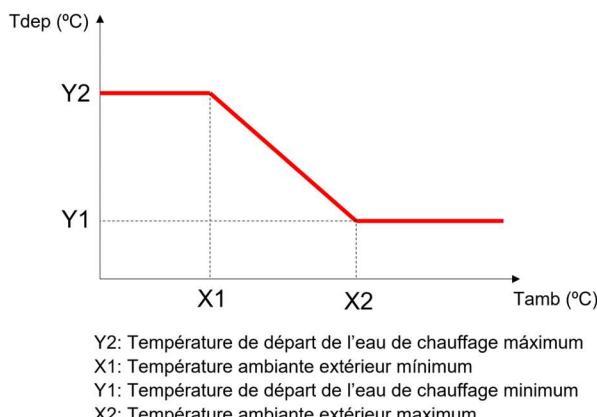


Figure 2. Courbe de comportement de la pompe à chaleur. Définition de la température de production en fonction de la température extérieure.

La plage de température extérieure dépend de la zone climatique dans laquelle l'unité est installée. La plage de température de production, elle, est déterminée pour ne pas générer d'inconfort thermique dû à des courants d'air ou à la faible efficacité des réseaux de distribution. Par exemple, dans ce cas, on a établi une température extérieur minimum et maximum allant de -5 à 15 °C à Nantes et de 0 à 18 °C à Marseille. Les températures de production minimum et maximum ont été définies entre 30 et 40 °C, pour que la température de production moyenne pour le plancher chauffant-rafrâîchissant soit d'environ 35 °C.

2| Contrôle multizone du plancher chauffant-rafrâîchissant et des ventilo-convecteurs monozone

La typologie des systèmes de chauffage et refroidissement est très variable à l'heure actuelle, car chaque installation peut comporter différentes unités terminales associées à un même système de production. Dans ce cas, il est essentiel de disposer d'un système de contrôle qui optimise le fonctionnement de tous les éléments du système. On propose pour cela une installation habituelle dans le secteur résidentiel des logements individuels : associer un plancher chauffant-rafrâîchissant et des ventilo-convecteurs monozone, avec une pompe à chaleur pour la production. Le système de contrôle d'Airzone pourra contrôler chaque unité terminale et la gestion de la production de la pompe à chaleur, et permettra de contrôler de manière individuelle la température dans chacune des zones, grâce à l'installation d'un thermostat dans chaque zone, comme décrit sur la figure 3.

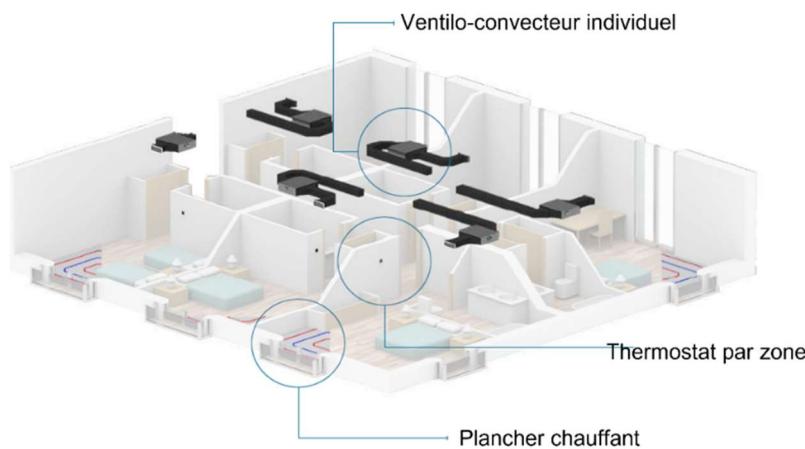


Figure 3. Schéma d'un système de contrôle multizone avec plancher chauffant-rafrâîchissant, ventilo-convecteurs monozone et pompe à chaleur.

Retrouvez ci-après une description plus détaillée de l'installation des éléments de contrôle. La figure 4 montre un schéma des différents éléments de contrôle de l'installation.

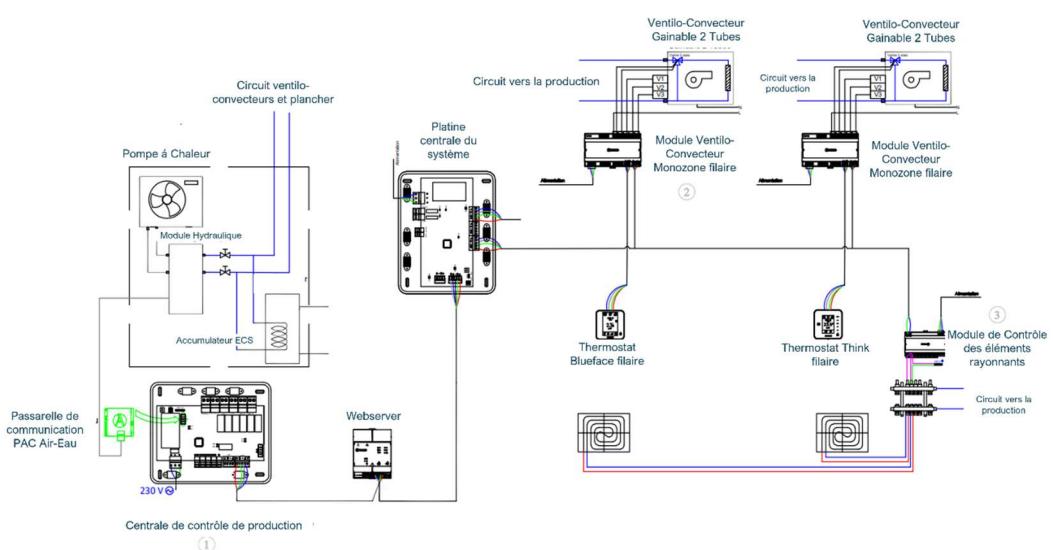


Figure 4. Schéma d'un système de contrôle multizone avec plancher chauffant-rafrâîchissant, ventilo-convecteurs monozone et pompe à chaleur.

Le système de contrôle se base sur les éléments suivants, décrits ci-après :

1. Gestion de la production. La platine centrale de contrôle de production, grâce à la passerelle de communication, permet de communiquer avec la pompe à chaleur et d'établir une température de production de consigne, adaptant ainsi la production aux besoins thermiques du bâtiment. La température de production est déterminée grâce à 2 facteurs :
 - Le type d'unité terminale en cours de fonctionnement. La même unité de PAC air-eau envoie de l'eau chaude à deux unités terminales ayant deux températures de fonctionnement différentes. Le ventilo-convecteur fonctionne à une température d'environ 45 °C et le plancher chauffant-rafaîchissant à une température d'environ 35 °C. En fonction de la demande de production d'eau chaude, le système de contrôle gère donc la production afin d'assurer le bon fonctionnement des deux unités terminales.
 - La demande thermique dans les zones. L'algorithme de contrôle est capable de déterminer le nombre de zones en demande thermique et le différentiel entre la température de chaque zone et la température de consigne établie par l'utilisateur dans chacune d'elles. Grâce à cette information, la température de production est adaptée aux besoins, afin de garantir le confort de l'utilisateur.
2. Module de gestion locale d'unité individuelle air-eau. Il permet de contrôler la vitesse du ventilateur et des vannes (pour des unités de type 0-10 V pour cette étude de cas).
 - Contrôle de la vanne du ventilo-convecteur 0-10 V. L'ouverture de la vanne est réalisée de manière proportionnelle, avec une sortie de tension de 0-10 V basée sur la demande thermique de la zone, en fonction de la différence entre la température ambiante et la température de consigne déterminée par l'utilisateur. L'ouverture d'entrée d'eau dans la batterie est plus élevée quand la différence de température est plus importante. On dispose également d'une sonde de température dans la batterie, qui s'affiche toutes les 2 minutes, afin de réajuster l'ouverture de la vanne, en cas de besoin.
 - Contrôle de la vitesse du ventilateur 0-10 V. La vitesse du ventilateur est ajustée en tenant compte de la différence entre la température ambiante et la température de consigne. De cette manière, le réglage est plus précis que sur les ventilateurs à vitesse prédéterminée.
3. Module de contrôle des éléments rayonnants. Il agit sur les moteurs électrothermiques alimentés à 230 VCA pour gérer les vannes de chaque zone. L'objectif est de garantir le contrôle de la température de chacune des zones pour maintenir le confort thermique. Il est également possible de gérer l'inertie thermique du plancher de chaque zone, pour éviter des situations d'inconfort pendant le démarrage du système, avec une fonction qui permet de maintenir le plancher à la température adaptée, au moment où l'utilisateur en a besoin.

Aménagement des modèles dans TRNSYS

Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel TRNSYS, référence en matière de recherche d'installations thermo-énergétiques. Cette plateforme de calcul s'est servie des modèles mathématiques de l'ensemble des systèmes de chauffage définis à la section précédente. Le système de contrôle décrit dans la section 2 a été modélisé, grâce à des équations mathématiques, pour former un modèle propre permettant d'interagir avec le bâtiment et le reste des éléments de l'environnement de la simulation (figure 5).

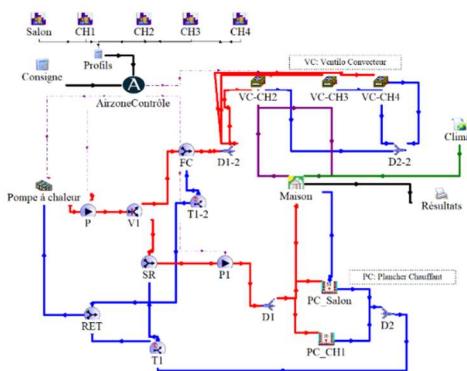


Figure 5. Installation simplifiée du système de contrôle dans Trnsys.

Il convient de noter que le modèle de pompe à chaleur a été développé sur la base des courbes de fonctionnement typiques obtenues dans les catalogues des fabricants. Le modèle permet en outre d'incorporer la modification de l'efficacité de la machine (COP) due à la fraction de charge.

Étude de cas

Les résultats de l'étude analysent la pertinence du système de contrôle hydronique d'Airzone, par rapport à celle du plancher chauffant-rafrâchissant proposé, du point de vue du confort thermique et de la consommation d'énergie. On réalise également une étude économique, afin d'obtenir une évaluation de la viabilité technico-économique.

Étude de cas

Il s'agit d'un logement individuel, d'une superficie totale 120 m², simulé dans les villes de Nantes et Marseille. Le logement comporte 5 zones chauffées et refroidies : Salon-Cuisine (SAL), Chambre 1 (CH1) au rez-de-chaussée, et Chambre 2 (CH2), Chambre 3 (CH3) et Chambre 4 (CH4) à l'étage (figure 6).

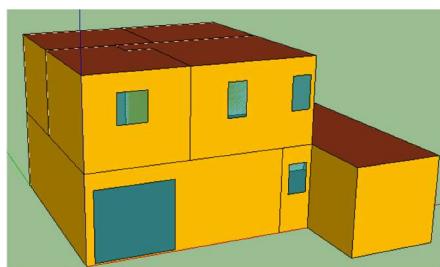


Figure 6. Plan du logement. Représentation en 3D, dimensions incluses.

Comme indiqué dans le tableau 1, cette étude tient compte des propriétés thermiques de l'enveloppe et des ouvertures caractéristiques en fonction de la zone climatique, conformément aux exigences établies dans le CTE.

Surface	Couches	Le coefficient de transfert thermique global U (W/m ² K)
Plancher bas	Houardis isolants	0,18
	Isolant sur dalle (100 mm)	0,215
Mur extérieur	Brique	1
	Isolation Laine de Verre (120 mm)	0,26
Mur intérieur	Cloison Perf.	0,22
Plafond	Plafond (450 mm)	0,1

Tableau 1. Caractéristiques thermiques de l'enveloppe du logement.

Les fenêtres battantes, avec cadre PVC, disposent des caractéristiques thermiques suivantes : $U = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, et facteur solaire de 0,42.

Étant donné que dans un système multizone la charge thermique des zones inoccupées n'est pas combattue, il est essentiel de déterminer le profil d'utilisation de chaque pièce (figure 7).

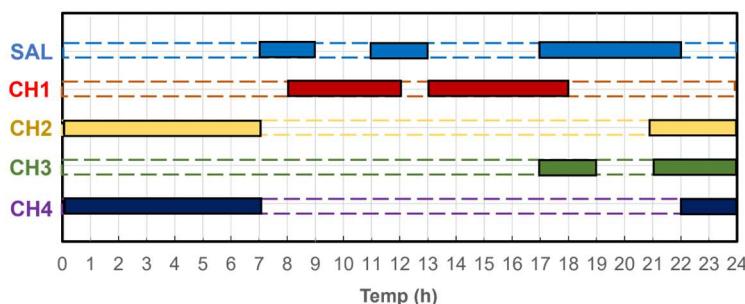


Figure 7. Profil d'occupation du logement.

On estime que pendant les heures d'inoccupation, le système de plancher chauffant-rafraîchissant continue à fonctionner, mais avec des températures de consigne plus basses, afin d'éviter une charge de chauffage excessive. La température de consigne des zones chauffées est de 20 °C, et de 18 °C lorsque les zones ne sont pas occupées. Les unités ont donc été dimensionnées en fonction des charges thermiques des zones, afin de s'assurer que le système puisse garantir le confort de l'utilisateur pendant la saison de chauffage. Une PAC air/eau double service DAIKIN Altherma 3e génération ERGA04DV [6] a été choisie comme système de production. Les ventilo-convecteurs gainables Fun du fabricant Aircalo [7] avec une régulation de la vitesse des ventilateurs de 0 à 10 V ont également été sélectionnés. Les ventilo-convecteurs choisis pour les 3 chambres sont du modèle FUN40 EC.

Résultats. Confort thermique

Évaluation du confort thermique

Les résultats de confort ne portent pas exclusivement sur la comparaison de la température de la zone. Ils évaluent également le confort selon la norme UNE ENE ISO 7730:2006[8].

Paramètres de confort : PMV et PPD

On effectue une comparaison des paramètres PPD et PMV d'un système multizone et d'un système sans régulation par zone dans des conditions standard de confort tenant compte de l'habillement, du métabolisme et de la vitesse relative de l'air.

Le PMV (*predicted mean vote*) est un indice qui reflète la valeur moyenne des votes d'un grand nombre de personnes sur une échelle de sensation thermique à 7 niveaux, lorsqu'elles sont soumises à différents environnements thermiques. L'échelle se base sur l'équilibre thermique du corps humain :

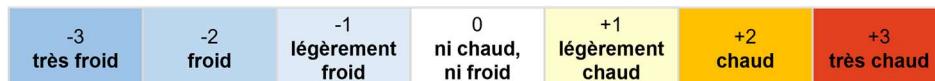


Figure 8. Échelle de PMV

Le calcul du PMV permet d'estimer la sensation thermique du corps humain dans son ensemble à partir de l'estimation ou de la mesure des paramètres qui conditionnent l'équilibre thermique global du corps : taux métabolique du sujet, isolation des vêtements, température de l'air, température moyenne rayonnante, vitesse relative de l'air et humidité de l'air.

L'indice PPD (*predicted percentage dissatisfied*) fournit des informations sur l'inconfort ou l'insatisfaction thermique en prédisant quantitativement le pourcentage de personnes susceptibles d'avoir trop chaud ou trop froid dans un environnement donné. Il est possible d'obtenir le PPD à partir du PMV.

Selon la norme UNE ENE ISO 7730:2006, les valeurs recommandées pour assurer un confort thermique global à 90 % des utilisateurs sont indiquées dans le tableau 2.

CLASSE	PPD (%)	PMV
A	<6	-0,2 < PMV < 0,2
B	<10	-0,5 < PMV < 0,5
C	<15	-0,7 < PMV < 0,7

Tableau 2. Classes d'environnement thermique selon le PPD et le PMV.

À l'heure actuelle, les exigences de confort dans les bâtiments sont élevées et l'objectif est d'atteindre la catégorie B, en particulier dans les bâtiments efficaces et durables qui obtiennent les certifications BREEAM ou LEED [9]. La figure 9 montre une comparaison du pourcentage d'heures pendant lesquelles les conditions de confort sont remplies dans les deux villes étudiées, pour chacune des zones thermiques du logement.

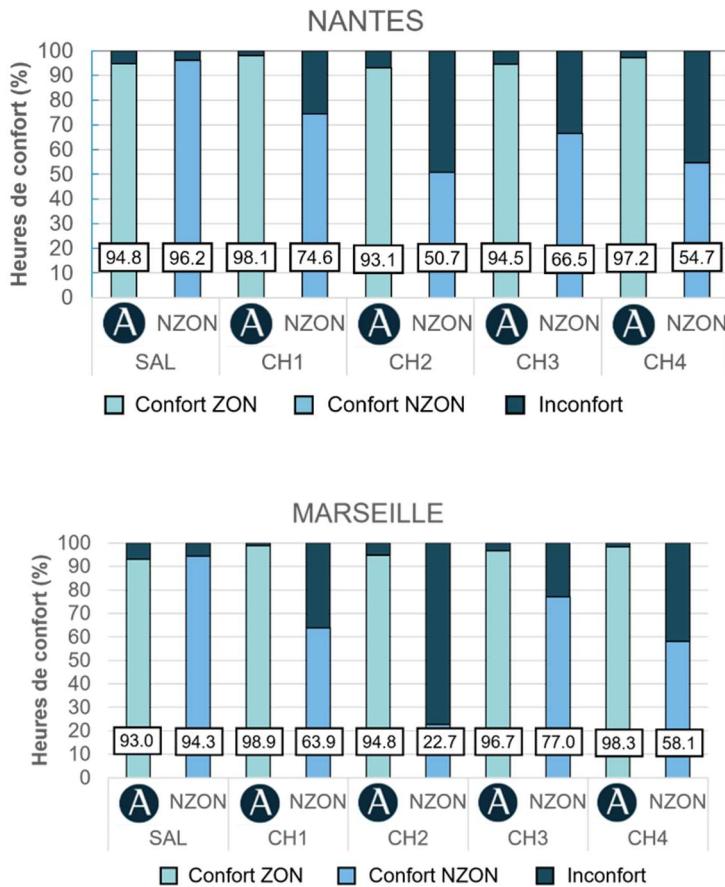


Figure 9. Comparatif des systèmes, pour comparer les catégories de confort

En général, on peut constater que le système multizone répond aux exigences de confort avec des pourcentages de confort très élevés, supérieurs à 93 % dans toutes les zones et dans les deux villes, où l'on obtient un PPD moyen d'environ 5-6 % et un PMV compris entre -0,5 et 0,5. Dans le comparatif avec le système sans régulation par zone, il convient de noter que dans la zone du salon, où se trouve le thermostat principal, les heures de confort correspondent à 94-96 %, mais que dans le reste des zones, il existe un écart important, avec des pourcentages de confort plus faibles. Cela est dû au fait que la température de chaque zone n'est pas contrôlée de manière individuelle. Le système de production est en effet réglé en fonction des conditions thermiques du salon. De ce fait, on note une surchauffe, tout particulièrement dans les chambres à l'étage, avec des valeurs de PMV bien au-dessus de 1. Cette situation est fréquente dans les bâtiments dont l'enveloppe est très isolée et où les pertes de chaleur vers l'extérieur en hiver sont minimisées, ce qui entraîne ce type de situation dans les systèmes de chauffage et refroidissement sans régulation par zone.

Résultats. Consommation d'énergie.

Après évaluation du confort thermique du bâtiment, l'étape suivante consiste à comparer la consommation électrique des deux systèmes. L'objectif est de démontrer que la stratégie de contrôle du système multizone est plus efficace du point de vue de la consommation d'énergie, en raison de sa capacité à gérer la production de la pompe à chaleur avec la passerelle de communication. Cette communication permet à la pompe à chaleur de fonctionner dans des conditions plus favorables, et donc d'obtenir un meilleur rendement. La

figure 10 montre les résultats obtenus en vue de la comparaison de ces systèmes dans les deux villes étudiées.

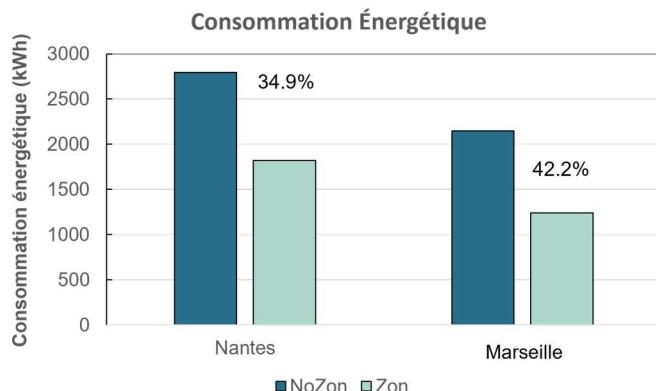


Figure 10. Comparatif de consommation électrique.

Dans les deux cas, la consommation en termes de chauffage est plus faible dans un système de contrôle multizone. C'est la gestion efficace de la pompe à chaleur, en fonction de la demande thermique de chaque zone, qui explique en grande partie l'obtention d'économies aussi importantes. D'autre part, le système multizone alterne entre deux types d'unités terminales. Tout d'abord, les ventilo-convection des chambres de l'étage, qui, bien que nécessitant des températures de production plus élevées, s'activent uniquement lorsque la zone est en demande. Enfin, le plancher chauffant-raffraîchissant des deux zones du rez-de-chaussée est toujours activé, bien qu'il soit régulé de manière efficace pour assurer le confort dans les deux zones. Par rapport à un système conventionnel, on remarque que ce système fonctionne en continu, 24 heures sur 24, et qu'il se régule de manière à ce que les zones occupées maintiennent une température de consigne de 20 °C et que les autres zones se maintiennent à une température légèrement inférieure (18 °C). Ceci afin d'éviter une dynamique de mise en marche/arrêt peu favorable pour les systèmes de plancher chauffant-raffraîchissant, en raison de la forte inertie du plancher. Cela garantit ainsi une consommation continue de la pompe à chaleur.

Sur la base de ces considérations, on constate que les économies obtenues sont de l'ordre de 35 % à Nantes et de 42 % à Marseille, où les hivers sont moins rigoureux et la consommation d'énergie plus faible qu'à Nantes.

Étude économique. Amortissement du système de contrôle d'Airzone.

L'analyse économique se base sur une comparaison entre l'investissement initial dans les unités de production, les unités terminales et les systèmes de contrôle, et les coûts de fonctionnement entraînés par la consommation du système de chauffage et refroidissement obtenus dans la simulation. Sur la base de ces données, on calcule le temps nécessaire pour amortir le système de contrôle d'Airzone. Le tableau 3 présente le coût des unités, obtenu à partir des catalogues des fabricants, pour le système conventionnel et le système multizone d'Airzone.

Coûts (€)	Système conventionnel	Airzone
PAC air-eau [6]	5908	5908
Ventiloconvecteurs [7]	-	3021
Plancher chauffant (110 €/m ²)	11 000 (100 m ²)	6 765 (61,5 m ²)
Contrôle du plancher chauffant conventionnel [10]	1151	-
Contrôle Airzone	-	3340
<i>Platine centrale Acuazone</i>	-	371
<i>Module de ventilo-convecteur</i>	-	573
<i>Thermostats BlueZero</i>	-	1265
<i>Module de plancher chauffant-rafrâîchissant</i>	-	253
<i>CCP</i>	-	270
<i>Webserver HUB</i>	-	304
<i>Passerelle A2W</i>	-	304
Total	18059	19034

Tableau 3. Coût initial des systèmes.

Le tableau montre que le coût initial du système multizone d'Airzone est plus élevé que celui du système conventionnel, en raison du coût des éléments du système de contrôle. Enfin, le tableau 4 présente le coût initial et les coûts de fonctionnement, calculés à partir des consommations annuelles obtenues à la figure 10 et du coût du kWh, estimé à une moyenne de 0,24 €/kWh au cours des derniers mois, en raison des grandes fluctuations de cette valeur [11].

	Coûts	Nantes	Marseille
Initial (€)	Airzone	19034	19034
	Système conventionnel	18059	18059
Fonctionnement (€)	Airzone	436	333
	Système conventionnel	670	516
Amortissement (années)		4,2	5,3

Tableau 4. Coût total des systèmes.

Comme on peut le constater, les économies réalisées sur les coûts de fonctionnement au cours d'une année type permettent d'amortir le système de contrôle sur un délai très raisonnable. Dans la ville de Nantes, où l'hiver est rigoureux, les coûts de fonctionnement sont importants et les économies sont donc plus importantes qu'à Marseille, où l'hiver est plus doux. Le délai d'amortissement est de 4,3 ans pour Nantes, contre 5,5 ans pour Marseille. Dans les deux cas, on peut considérer que le délai d'amortissement du système de contrôle Airzone est inférieur à 6 ans, et donc économiquement viable.

Conclusions

Cette étude analyse en détail le comportement du système de contrôle de systèmes hydroniques avec PAC air-eau d'Airzone, appliqué à un système multizone avec plancher

chauffant-raffaîchissant et ventilo-convection monozone, et le compare à celui d'un système de plancher chauffant-raffaîchissant sans régulation par zone.

Les conclusions de l'étude décrivent les principaux avantages obtenus lors des différentes comparaisons en matière de confort thermique, de consommation électrique et de délai d'amortissement du système de contrôle. Voici les différentes conclusions :

1. Le système de contrôle multizone contrôle indépendamment la température dans chacune des zones d'une maison, ce qui garantit un pourcentage d'heures de confort supérieur à 93 %, avec des valeurs de confort thermique très favorables pour les utilisateurs du bâtiment. Ce système est comparé à un système conventionnel ne comportant qu'un seul thermostat dans une zone principale pour réguler le fonctionnement du système, ce qui provoque une surchauffe dans le reste des zones, avec des valeurs d'heures d'inconfort allant jusqu'à 77 % dans certaines zones.
2. Le système de contrôle proposé contrôle la température de la pompe à chaleur en régulant de manière efficace le plancher chauffant-raffaîchissant et les ventilo-convection en fonction des besoins thermiques de chaque zone, ce qui se traduit par des économies d'énergie de 35 % à Nantes et de 42 % à Marseille.
3. Bien qu'il soit nécessaire de réaliser un investissement initial dans le système de contrôle, l'étude économique montre un délai d'amortissement nécessaire abordable, de 4,2 ans à Nantes et de 5,3 ans à Marseille. La viabilité économique du système est donc confirmée.

Références

- [1] Commission européenne. Directive 2012/27/UE du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique. Journal officiel des Communautés européennes (2012), L 315/1.
- [2] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy. Strasbourg 8.03.2022.
- [3] IEA (2022), The Future of Heat Pumps, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>, License: CC BY 4.0
- [4] Rénovation. Les aides financières en 2022. Agence de la Transition Écologique (ADEME). 2022.
- [5] TRNSYS <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>. (Consulté le 23/07/21).
- [6] Catalogue de chauffage Daikin 2022.
https://www.daikin.be/fr_be/installateurs/support-technique/brochures.html
- [7] Aircalo. Ventilo-convector gainable. Notice technico-commerciale (2023).
https://aircalo.fr/fichiers/Fun/03_aircalo_ventilo-convector_gainable_fun_23_02_fr.pdf
- [8] UNE-EN 15377. Systèmes de chauffage dans les bâtiments. Conception des systèmes de chauffage et refroidissement par le sol, le mur et le plafond. Octobre 2008.

- [9] BRE, BREEAM offices 2008 assessor manual, BREEAM. Watford: BRE Global Ltd.; 2010.
- [10] Sanier Duval. Catalogue Tarif 2023 Fabriqué en France(1) Fiers d'être votre partenaire au quotidien (2023).
- [11] Eurostat. Prix de l'électricité par type d'utilisateur
<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=fr>